

新制
理
884
京大附函

学位申請論文

岩室史英

学位申請論文

O H 夜光除去分光器の開発

京都大学理学部物理学第二教室
宇宙線研究室

岩室 史英

Abstract

より暗く、より小さい天体を目指し、天文学は発達してきた。暗い天体の検出はノイズとの闘いであり、より小さい天体の観測は地球大気の揺らぎとの闘いである。近年、光学精度の良い大型望遠鏡と感度の高い検出装置を用いて、非常に遠方の銀河やクエーサーが観測されるようになったが、それらの天体は光速に近い速度で地球から遠ざかっているために、ドップラー効果により波長が何倍にも伸び、可視光に相当する波長の光は近赤外でなければ観測できない。近赤外での天文学は、ここ数年でのめざましい検出素子の発達により、可視光での天文学にかなり近い観測が行なわれるようになってきたが、大気の吸収や大きいバックグラウンドノイズのため、非常に遠くの暗い天体は、ある程度条件の良い特定の波長の光でしか観測されていない。近赤外でのバックグラウンドには2種類の成分があり、一つは大気や観測装置からの熱輻射で主に $2\mu\text{m}$ 以上の波長で影響を及ぼし、もう一つは大気上層のOHラジカルが放出する数多くの幅の細い輝線で、OH夜光と呼ばれ主に $1\sim 2\mu\text{m}$ の波長での観測に影響を及ぼす。OH夜光輝線は非常に強くかつ時間変動がかなりあるため、この波長域での暗い天体の観測を妨げているが、輝線と輝線の間はバックグラウンドの光はほとんどなく、夜光を取り除いて観測することができれば、非常に暗い天体の観測が行えるものと考えられた。

OH夜光輝線は $1\sim 2\mu\text{m}$ の波長域に数百本存在し、これらの輝線をできるだけ高い波長分解能で取り除かなければならない。最も簡単な方法として、輝線を出す気体と同じ成分の気体を準備し、化学的に吸収させる方法が考えられるが、OH夜光輝線はOHラジカルの高い順位間での回転・振動の遷移であり、吸収させるために準備した気体自身が発光してしまうために、この方法では輝線を取り除くことはできない。高い波長分解能の分光器を用いれば夜光輝線を解析的に取り除くことができるが、天体からの光が薄まってしまうために、観測は非常に困難なものとなる。高い波長分解能で分光をし、OH夜光輝線を取り除いた後、再び元の状態に光学的な方法で戻すことができれば、暗い天体からの光を薄めることなく、バックグラウンドの低い状態で観測することができる。このような装置が、製作可能であるかどうかを検討するために、独自の光路追跡プログラムを平成2年に製作し、設計を試みた。その結果、ハワイ大2.2m望遠鏡を対象とした、OH夜光除去分光器（英語名 OH Suppressor Spectrograph、略称 OHS）の光学設計に翌年成功し、詳細部の部品を設計・外注し、平成4年8月に世界で初のOHS第一号器が完成した。この装置は2つの全く同じ高分散分光器を並行に配置し、片方を用いて高分散分光をした後、夜光輝線以外の波長の光をもう一方の分光器に逆方向から入射させ、元の光に戻すもので、途中、プリズムを用いることによって、低い波長分解能での分光観測もできるように設計されている。検出器にはハワイ大の所持する赤外線カメラを用い、全体の大きさは $2\text{m}\times 1\text{m}$ 、重さ約 250kg で、ハワイ大2.2m望遠鏡に直接取り付ける装置としては、最大級のものとなった。

観測はハワイ大天文台の協力により1992年11月、翌93年3月、10月と約半年に1回の割合で現在までに3回行なわれ（その後、第四回目の観測が94年3月に行なわれた）、夜光マスクを始めとする様々な部分の改良、調整方法、解析方法の確立などがなされた。現在の装置性能は、夜光除去率 $1/18$ 、検出器の量子効率を含めた観測システ

ム全体の効率は5%で、従来の観測方法より最大で約1等検出限界が向上している。しかし、OHS第一号器は、分光観測の際、プリズムを常温で用いているため、この波長帯では通常問題とならない熱輻射成分が夜光成分を上回っており、また、検出素子の暗電流・読みだしノイズ等も、暗い天体の観測に影響を与えている。そのため、OHSの性能を十分に発揮するためには、分散素子が冷却された本格的な赤外分光器と、暗電流・読みだしノイズが小さい優秀な赤外線検出素子が必要となっている。また、OHSの光透過効率は主に2つのグレーティングの効率によって定められていることがほぼ判っており、反射効率の高いグレーティングを製作することも必要である。

近年、可視光の検出素子のめざましい発達により、暗い天体の観測能力が向上してきたが、可視光の検出素子の性能がほぼ限界に達した現在、各国は競って大型望遠鏡の建設を始めた。日本もハワイ島マウナケア山頂に口径8.2mの大型光学赤外望遠鏡「すばる」の建設を始めており、これらの望遠鏡が本格的に稼動し始める90年代後半には、遠方の天体が次々に発見されるであろう。その場合、近赤外でのそれらの天体の観測は非常に重要となるが、1~2 μ m波長域でのOHS以外での観測はいかに大型望遠鏡と言えども、~~不明~~明るくかつ時間変動する夜天光のために、相当困難であることが予想される。すばる望遠鏡に対するOHS第二号器は、最終検出部にあたる赤外線カメラ/分光器以外の部分の光学設計を既に終了し、現在、カメラ部分の光学設計を行なっている段階である。現在OHSは、すばる望遠鏡第一期観測装置の有力候補となっており、比較的早い段階での性能発揮が期待されている。

現在観測は宇宙年齢の90%の部分にまで及んでいるが、遠方の天体のほとんどは電波や紫外線を異常に強く放射している”特殊な”天体である。これらの天体が、現在の宇宙とどの様に関係しているのか、また、銀河やクエーサーがいつ頃発生し、どの様に進化してきたかはほとんど解明されていない。OHSでの観測は、銀河が発生したと考えられている、宇宙年齢の60~90%の昔の宇宙での可視光、それより遠い宇宙（明るい天体があるかどうかは不明）での紫外線の観測に相当し、それにより銀河やクエーサー発生の起源を探ることが、OHSの最大の天文学的目標である。

この論文は、OHS第一号器の設計・製作から観測に至るまでの全てと、すばる望遠鏡に対しての、OHS第二号器の光学設計と観測目標について述べるものである。

目次

1. 赤外線天文学とOH夜光除去分光器	5
2. 光学計算	
2-1. 光路追跡プログラム	11
2-2. 装置の光学設計	18
3. 目標性能	
3-1. 夜光除去率と透過効率	27
3-2. 性能予測	35
4. 機械設計と製作	
4-1. 光学素子とホルダー	41
4-2. 夜光マスク	49
5. 観測	
5-1. 試験観測と性能評価	56
5-2. 観測	73
6. 将来計画～「すばる」8m望遠鏡用OHS	
6-1. 基本設計と目標性能	89
6-2. 原始銀河観測シミュレーション	97
要約・謝辞	114
参考文献	115

Appendix

- A. 収差公式
- B. 夜光輝線データ
- C. 第一回観測結果
- D. 第二回観測結果
- E. 第三回観測結果
- F. 第四回観測結果（最新観測結果）

第 1 章

1 赤外線天文学とOH夜光除去分光器

1931年 K. Jansky によって宇宙からの電波が発見されてから半世紀の間に、ほとんど全ての波長で宇宙の観測が行なわれるようになった。電波工学の発達とともに電波天文学が、ロケット技術の発達による衛星時代の到来とともにX線天文学が発展した。可視光による従来からの天文学は、1970年代以降の急速な半導体検出器の発達により、写真乾板による観測からCCDによる観測へと変化し、観測精度が飛躍的に向上した。半導体検出器の発達は、同時に赤外線検出用の半導体を生み出し、赤外線天文学が誕生した。電波・赤外線・可視光・紫外線・X線・γ線、全て同じ”光”ではあるものの、観測する波長によって対象となる物理現象は異なり、一般に波長が長いほど低エネルギー・低温・質量の大きい分子の物理現象を、波長が短いほど高エネルギー・高温・高電離原子の物理を観測している（更に、電波は電離プラズマの観測にも適している）と考えて良い。他に、

波長	名称	主な観測手段
1 m ~	メートル波	電波望遠鏡
10 cm		
1 cm ~	センチ波	
1 mm ~	ミリ波	電波望遠鏡、気球、 ロケット、衛星
100 μm ~	サブミリ波・遠赤外線	
10 μm ~	中間赤外線	光学望遠鏡、衛星
1 μm ~	近赤外線	
1000 Å ~	可視光	衛星、ロケット
100 Å ~	紫外線	
10 Å		
1 Å ~	軟X線	
0.1 Å ~	硬X線	
~ 0.1 Å	γ線	

表1-1 様々な波長での観測手段

ニュートリノを扱うニュートリノ天文学、重力波を扱う重力波天文学などもあるが、どちらも光を扱わず、光では観測できない天体の最深部を観測対象としている点に於て、やや異質の天文学である。

表1-1に挙げた観測手段の違いは、主として地球大気の透過率の違いによるもので、可視光とセンチ波・メートル波は大気による吸収はほとんど無いが、ミリ波から近赤外線にかけての地上からの観測は、部分的に大気の吸収が少ない「大気の窓」と呼ばれる波長帯での観測に限定され、紫外線より波長の短い光は地球大気を通過できないので、人工衛星による観測しかできない。また、望遠鏡の反射面精度は最低でも波長の1/4以下の精

度が必要なため、波長が長い電波（メートル波）では直径100mもの巨大望遠鏡をつくることができるが、可視・赤外線望遠鏡は高い鏡面精度が必要であるため、これまでつくられた望遠鏡は最大のものでも、鏡の直径が5～6mである（しかし、最近8～10m級望遠鏡が建設されつつある）。X線の場合、光は波と言うよりは粒子としての性質が強く、一つ一つの光子を粒子として別々に検出するため、望遠鏡の鏡面自体の精度は光学望遠鏡ほどは要求されていない。

	天文台	口径	所在地	
光学望遠鏡	Keck	10m×2	ハワイ	建設中
	すばる	8.2m	ハワイ	
	VLT	8m×4	チリ	
	Gemini	8m	ハワイ	
	Special Ap.Obs.	6m	ロシア	他、
	Hale	5m	アメリカ	4～5m 3台
				3～4m 11台
				2～3m 25台
電波望遠鏡	Effelsberg	100m	ドイツ	
	GBT	100m	アメリカ	
	Jodrell Bank	76m	イギリス	
	Parkes	64m	オーストラリア	
	野辺山	45m	日本	
干渉計	VLBA	25m×10	アメリカ	建設中
	MERLIN	76-15m×7	イギリス	
	VLA	25m×27	アメリカ	
	AT	22m×6	オーストラリア	

表1-2 主な光学望遠鏡と電波望遠鏡（及び干渉計）

赤外線天文学は、近赤外線～遠赤外線で観測を行なう天文学で、主に星間塵・星間分子・低温度星・原始星等の観測に適した天文学である。可視光に比べ、星間塵や星間空間での減光を受けにくいいため、暗黒星雲・銀河中心等の可視光では見通せない領域の観測を行なうことができるが、赤外線の半導体検出素子が発展途上であることと（主に軍用でしか開発されていない）、可視光に比べ熱輻射などのバックグラウンドノイズが格段に大きいこと、大気の吸収により地上からは一部の波長帯でしか観測できないこと等があり、天文学としてはまだまだ未成熟の分野である。一言で赤外線観測と言っても、熱輻射が大きく大気の窓の少ない中間赤外から遠赤外にかけては、気球や人工衛星に装置全体を冷却した冷却望遠鏡を搭載し、検出素子には Si:As 等の半導体検出素子やボロメータ（素子の温度上昇を測定することによって、光子を検出する検出器）を用いて観測し、近赤外では常

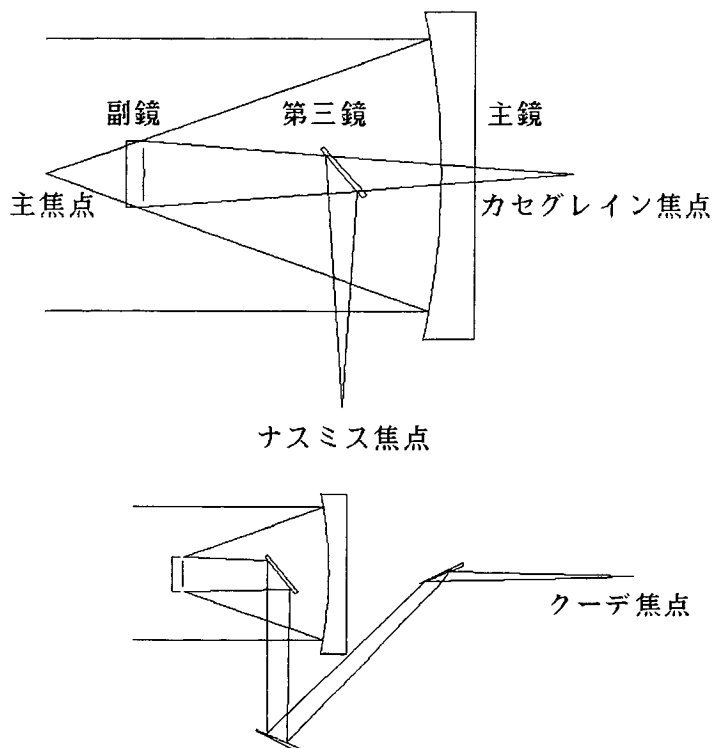


図 1 - 1 光学望遠鏡

現在、最先端で活躍している光学望遠鏡は、すべて反射望遠鏡である。

素材	波長域 μm	素子数	素子 μm	量子効率 %	暗電流 e/s	読ノイズ e r.m.s
Si	0.4~1	2048x2048	15	~80	0.2	4
HgCdTe	1~2.5	256x256	40	>50	<5	<20
InSb	1~5.5	256x256	30	>90	45	10~50
PtSi	1~5	256x256	30	3~7	<10	<60
Si:As	5~25	128x128	75	>30	<100	<300

表 1 - 3 代表的な半導体検出素子の性能

温の光学望遠鏡に HgCdTe, InSb, PtSi 等の半導体検出素子を用いた冷却光学系を取り付けて観測を行なう。赤外線検出素子は、非常にエネルギーの低い光子を検出するため、暗電流や読みだしノイズが可視光の検出素子に比べ格段に大きいが、通常の観測ではバックグラウンドノイズがそれらを上回っており、あまり問題とはなっていない。

近年、可視光の検出素子はほぼ限界まで性能を高め、素子の大型化による観測視野の拡大、望遠鏡の大型化による検出限界の向上へと光学天文学は進展しつつある。それに伴い、

非常に遠方の天体が次々と発見され、今後、その様な宇宙初期の天体の発見が飛躍的に増加することが予想されている。しかし、宇宙は膨張しており、遠方の天体になればなるほど急速に我々から遠ざかっているため、光のドップラー効果により天体から発せられた光は波長が何倍にも引き延ばされて観測される。この効果は赤方偏移と呼ばれ、宇宙論では赤方偏移パラメータ z を用いて、

$$\text{観測波長} = \text{光源での波長} \times (1 + z)$$

と表されている。現在観測されている最も遠いクエーサーは $z = 4.9$ (PC1247+3406)、最も遠い銀河は $z = 3.8$ (4C41.17) で、これらの天体の場合、波長はそれぞれ 5.9 倍、4.8 倍に引き延ばされており、可視光での観測は天体の紫外線部分の観測をしていることになる。すなわち、これらの天体の可視光部分の観測は、もはや可視光では観測できず近赤外域で観測されることになる。その様な意味で、可視光の延長である近赤外での観測は今後ますます重要になって来るが、近赤外には可視光の 100 倍以上強度のバックグラウンドがあり、そのような悪条件下での暗い天体の観測は、大型望遠鏡といえども容易な

波長帯	中心波長 μm	波長幅 μm	面輝度 mag/arcsec^2
U	0.36	0.068	21.6
B	0.44	0.098	22.3
V	0.55	0.089	21.1
R	0.70	0.22	20.3
I	0.90	0.24	19.2
J	1.25	0.38	15.8
H	1.65	0.30	13.9
K	2.21	0.48	12.6
L	3.40	0.70	4.5
M	5.00	1.13	0.0

表 1-4 各波長帯での背景光の明るさ

ことではない。図 1-2 に示すように、近赤外域は主に大気中の水分子により部分的に吸収を受けており、いくつかの大気の窓に分かれている。中でも K バンド (2.0 ~ 2.4 μm) は、他の近赤外の波長帯に比べて比較的 background light が少なく (図 1-3)、現在近赤外で行なわれている遠方天体の観測のほとんどは、この波長帯での観測である。近赤外での background light の主な原因は、この K バンドを境にして、長波長側は大気や観測装置からの熱放射、短波長側は大気中の OH ラジカルや O_2 分子の発する夜光輝線であるが、夜光輝線は非常にせまい波長間隔で並んでおり、高分散分光観測以外の観測では、熱放射も夜光輝線も強い

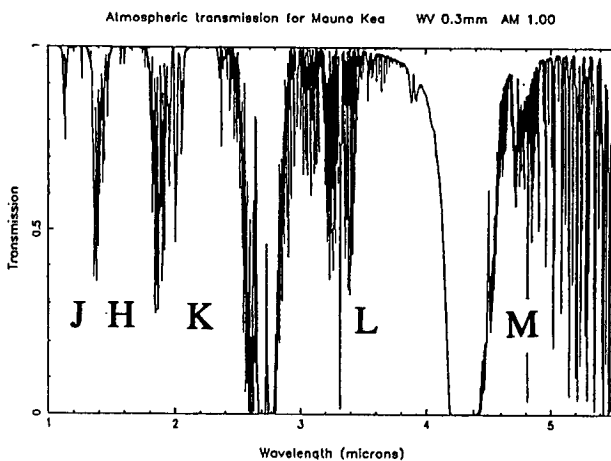


図 1 - 2 近赤外での大気窓

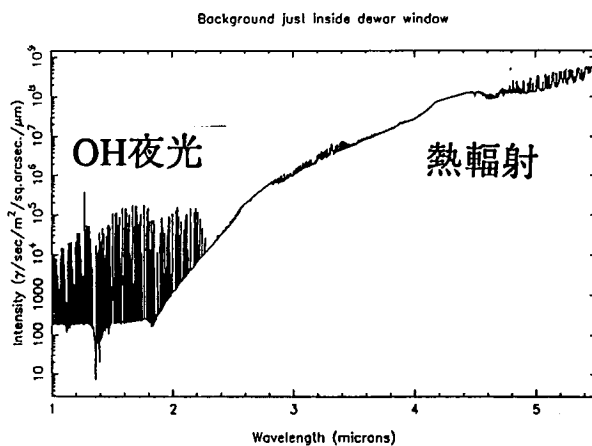


図 1 - 3 近赤外での背景光

ノイズ源であることにはかわりが無い。高分散分光観測の場合、夜光輝線は混ざり合うことなく一つ一つが独立で観測され、輝線と輝線の間は可視光並にバックグラウンドの低い部分となるが、その様な観測の場合、天体からの光は相当に薄められてしまうため、検出素子の性能で定められる明るい天体の観測に限られてしまう。しかし、夜光輝線の間部分だけを集めて、すなわち、夜光輝線の部分だけを取り除いて、天体からの光を薄めることなく観測できれば、Jバンド・Hバンドでは可視光と同様な、宇宙空間からの観測に近い条件下で測光・分光観測が行えることになる。この様な装置「OH夜光除去分光器(OHS)」は、今後の大型望遠鏡時代での遠方の天体観測にとって最も重要な装置の一つであり、以前から京大やハワイ大で装置の概念が検討されていたが、1991年に独自の光路追跡プログラムにより光学設計に成功し、翌年、ハワイ大2.2m望遠鏡に対するOHS第一号器が完成した。現在、世界中で稼動しているOHSはこの一台だけであるが、大型望遠鏡「すばる」に対して設計されているOHS第二号器と併せて、この波長帯での最も先進的な装置として脚光を浴びている。

第 2 章

2 光学計算

2-1 光路追跡プログラム

OHSの光学設計をするため、光路追跡プログラムを製作した。ここではこのプログラムの計算部分について触れ、光路追跡計算および収差計算の概要を述べる。

2-1-1 光路追跡計算

光学計算に必要な初期条件は様々なものがあるが、大きく分けて入射光線に関する条件と、光学素子に関する条件とがある。入射光線は一本の光線に対し、入射位置・方向ベクトル・波長の合計7つの初期条件で与えられ、光学素子は一つの面に対し、中心位置・空間中での回転角・面の形状・面の種類等、最大で22もの初期条件が与えられる。入射光

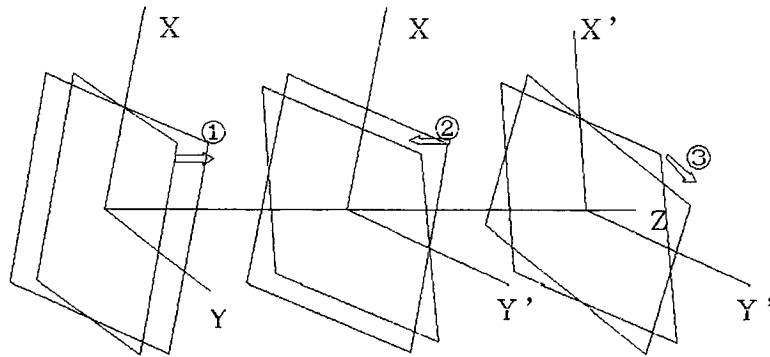


図 2-1 光学面の回転角

線は一度の計算で数十本、場合により100本以上の数を扱うので、一つ一つに付いてこれらの初期条件を与えるのは大変な作業である。そこで、入射光のF比（光の広がり方に対する進行距離の比率）と入射窓の大きさを与えることにより、全ての光線に適切な初期条件を自動的に割り振るようにした。また、同じ点から入射する光を同一の光束に属する光として識別し、それらの光が最終的にどの場所にあるかによって、像精度が自動的に評価できるようにした。

入射光線が与えられれば、次は光学素子との交点を求める計算である。この計算は、一般的な複雑な形状を持った光学素子に対し、任意の位置・任意の角度で行なうのは非常に困難であるので、まず、光学面の中心を原点まで平行移動し、次に光学素子の回転角が全て0（面の中心の方向ベクトルがz軸方向を向いた状態）となるように回転移動を行なう。光線の入射位置 $\mathbf{p}_1 = (px_1, py_1, pz_1)$ 、光線の方角ベクトル $\mathbf{v}_1 = (vx_1, vy_1, vz_1)$ 、光学面の中心位置 $\mathbf{o} = (ox, oy, oz)$ 、光学面の回転角 (ot, op, oq) として、（回転角は、図2-1.の左から順に ot, op, oq としている）平行・回転移動後の光線の位置と方向は、

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_2 &= A (\mathbf{p}_1 - \mathbf{o}) \\ \mathbf{v}_2 &= A \mathbf{v}_1 \end{aligned} \quad \text{ただし} \quad A = \begin{bmatrix} axx & axy & axz \\ ayx & ayy & ayz \\ azx & azy & azz \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
axx &= \cos (op) \cos (oq) \\
axy &= \sin (ot) \sin (op) \cos (oq) + \cos (ot) \sin (oq) \\
axz &= -\cos (ot) \sin (op) \cos (oq) + \sin (ot) \sin (oq) \\
ayx &= -\cos (op) \sin (oq) \\
ayy &= -\sin (ot) \sin (op) \sin (oq) + \cos (ot) \cos (oq) \\
ayz &= \cos (ot) \sin (op) \sin (oq) + \sin (ot) \cos (oq) \\
azx &= \sin (op) \\
azy &= -\sin (ot) \cos (op) \\
azz &= \cos (ot) \cos (op)
\end{aligned}$$

次に、光学面の形状を表す方程式を $f(x, y, z) = 0$ として、

$$f(\mathbf{p}_2 + \mathbf{v}_2 t) = 0$$

の条件より媒介変数 t の値を求め、光学面との交点を計算する。光学面の形状を表す方程式は、ほぼすべて次の形式で与えられる。

$$f(x, y, z) = c(x^2 + u y^2) + s c z^2 - 2 e z = 0 \quad (2-1-1.a)$$

c は曲率、 s は基本形状、 u は y 軸方向の圧縮率の 2 乗、 e は円錐面の指定の役割を果たしており、それぞれの値による具体的な形状は以下のとおりである。

$e = 1$ のとき		
$c < 0$ 凸面	$s < 0$ 双曲面	$u < 0$ 馬の鞍面
$c = 0$ 平面	$s = 0$ 放物面	$u = 0$ 柱状面
$c > 0$ 凹面	$s > 0$ 楕円面	$u > 0$ 3次元楕円体面
	($s = 1$ のとき球面)	($u = 1$ のとき回転体面)

$e = 0$ のとき ($s < 0$ 、この場合 $\sqrt{-s}$ は頂角の正接を表す)		
$c = -1$ 凸円錐面	$u < 0$ 馬の鞍状錐面	
$c = 1$ 凹円錐面	$u = 0$ 交わる 2 平面	
(± 1 の値に限る)	$u > 0$ 楕円錐面	
	($u = 1$ のとき円錐面)	

この他にも、高次補正項を含んだ面、トーラス状面等の関数を指定することもできるが、その場合方程式が 4 次以上になり、解析的に解くことができないので、ニュートン法を用いて集束計算を行なっている。

交点が計算されると光線の出射ベクトルの計算に移るが、そのためにはまず交点での光学面の法線ベクトルが必要となる。 $f(x, y, z) = 0$ の両辺を微分することにより、

法線ベクトル \mathbf{n} は上記の関数に対して

$$\mathbf{n} = (c x, u c y, s c z - e)$$

となるが、光学面の性質により出射ベクトルはそれぞれ次の条件で与えられる（ここでのベクトルは、全て長さが1に規格化してあるものを用いる）。

$$\text{反射面} \quad : \quad (\mathbf{v}_3 - \mathbf{v}_2) \times \mathbf{n} = \mathbf{0} \quad (\text{反射の法則})$$

$$\text{屈折面} \quad : \quad (N_2 \mathbf{v}_3 - N_1 \mathbf{v}_2) \times \mathbf{n} = \mathbf{0} \quad (\text{屈折の法則、} N_1, N_2 \text{ は光学面前後での屈折率})$$

回折格子面: groove（回折格子の溝）に平行なベクトルを \mathbf{m} 、 $\mathbf{l} = \mathbf{m} \times \mathbf{n}$ 、回折格子の次数を m 、溝間隔を d とすると、

$$d (N_2 \mathbf{v}_3 + N_1 \mathbf{v}_2) \cdot \mathbf{l} = m \lambda \quad (\text{groove に垂直な成分の光路差})$$

$$(\mathbf{v}_3 + \mathbf{v}_2) \cdot \mathbf{m} = 0 \quad (\text{反射または屈折の法則})$$

$$\text{または } (N_2 \mathbf{v}_3 + N_1 \mathbf{v}_2) \cdot \mathbf{m} = 0$$

回折格子に入射する光が、groove に対し平行な成分を持つ場合、出射光線のエネルギー分布はある程度の広がりを持った角度になると考えられ、一本の光線で代表させることはやや危険ではあるが、groove に対し平行な成分と垂直な成分が、最も強め合う方向を出射光線の代表的な方向として定めることにした。しかし実際の光学的な回折格子は、groove 断面が同じ方向を向いた鏡面 (blaze と呼ばれる) の様になっており、強度が最大になる方向は blaze の角度にかなり依存すると考えられるので、この条件がどのような場合にも代表的なエネルギーの進行方向を表しているとは言えないので、注意する必要がある。また、屈折面での媒質の屈折率は、実験室での測定データを必要な部分のみ関数で近似し、使用する波長での屈折率を計算して用いている。

出射ベクトルの方向が計算できたら、もう一度回転・平行移動をして光学面を元の位置に戻す。結局、最終的な出射点・出射ベクトルは

$$\mathbf{p}_4 = B \mathbf{p}_3 + \mathbf{o}$$

$$\mathbf{v}_4 = B \mathbf{v}_3$$

$$\text{ただし } B = \begin{bmatrix} a_{xx} & a_{yx} & a_{zx} \\ a_{xy} & a_{yy} & a_{zy} \\ a_{xz} & a_{yz} & a_{zz} \end{bmatrix}$$

により計算することができる。この計算を全ての光学面に対し、順次行なっていけば、最終的に一本の光線がどの場所に到達したかが計算でき、同じ点から入射した光がどの程度の範囲に広がっているかを調べることによって、光の集まり具合を評価する事ができる。

2-1-2. 収差計算の概要

一本の回転対称軸を持つような光学系（カメラレンズなど）に対しては、収差理論がよく発達しており、二本の光線の計算と各光学面の形状だけから、焦点の評価をする事がで

きる。上記の光路追跡は数多くの光に対しての計算が必要なのに対し、収差理論の公式を用いると計算量が大幅に減り、かつ焦点面全面にわたっての情報が均一に得られるので、一次元配置の光学系の場合、非常に有効である。

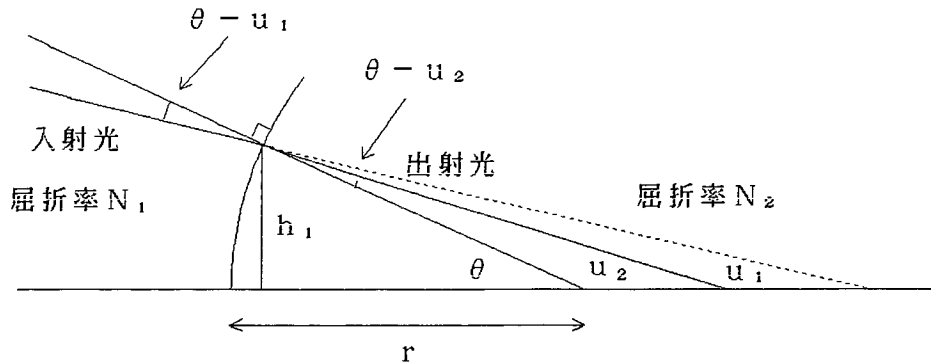


図 2-2 近軸光線の屈折

曲率半径 r の境界を持つ、屈折率 N_1 、 N_2 の 2 つの媒質中での、中心軸に極めて近い光線（近軸光線）の光路を考えてみる。入射光線は中心軸からの距離（入射高） h_1 で境界面と交わるとすると、入射光線・出射光線と中心軸との角度（傾角） u_1 、 u_2 は屈折の法則（Snell の法則）を満たし、 $x \cong 0$ において $\sin x \cong x \cong \tan x$ の近似を用いると次のように表される。

$$N_1 (\theta - u_1) = N_2 (\theta - u_2) \quad \text{ただし} \quad \theta = h_1 / r$$

この式より、入射光線の傾角から出射光線の傾角を導く式として次式が得られる。

$$N_2 u_2 = N_1 u_1 + \phi h_1 \quad (2-1-2.a)$$

$$\phi = (N_2 - N_1) / r \quad (2-1-2.b)$$

ϕ は光学面の power と呼ばれる値で、光学面の「集光力」を表す値である。また、光学面間の距離を d とすると、その次の光学面での入射高 h_2 は

$$h_2 = h_1 - u_1 d \quad (2-1-2.c)$$

と計算されるので、2-1-2.a~c 式を全ての光学面に対し順次計算していくことにより、近軸光線の追跡を行なうことができる。

次に、power ϕ の平面で物体からの光を集めることを考える。物体の存在する面を物体平面、像のできる面を像平面と呼び、光学面を原点として物体平面・像平面の位置を g_1 、 g_2 と表すことにすると、式 2-1-2.a は次式のようなになる。

$$N_2 / g_2 = N_1 / g_1 + \phi \quad (2-1-2.d)$$

焦点は、光学面に平行光線を入射させたとき結像する位置として定義されるが、特に物体側から平行光線を入射させたときにできる焦点と、像側から入射させたときにできる焦点を区別する場合、それぞれを像側焦点、物体側焦点と呼ぶ。物体側焦点の位置を s_1 、像側焦点の位置を s_2 とすると、式 2-1-2.d より次式のように焦点距離 f が定義される。

$$f = s_2 / N_2 = -s_1 / N_1 = 1 / \phi \quad (2-1-2.e)$$

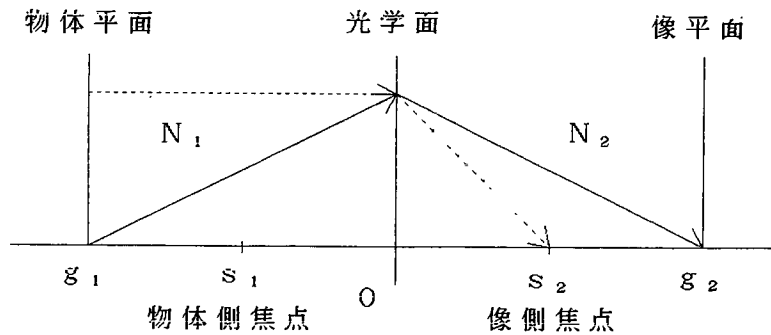


図 2-3 一つの光学面での結像 (g_1, s_1 は負値であることに注意)

複数の光学面からなる光学系の場合、物体側から入射させた平行光線の延長線と像側焦点に集まる光の延長線の交点は、ある一定の平面上で交わり、その平面を像側主平面という。また、逆に像側から平行光線を入射させた場合にも同様な平面が存在し、それを物体側主平面という。2つの主平面は、物体平面と像平面との間の結像関係において節のようになっており、主平面間の距離を0とした場合、複数の光学面は一つの光学面と等価になるという性質を持つ。すなわち、物体側主平面を -0 としたときの物体平面の位置を g_1 、像側主平面の位置を $+0$ としたときの像平面の位置を g_2 とすると、式 2-1-2.d はそのまま成り立つのである。このとき、合成された power は焦点距離の逆数として定義される。また、

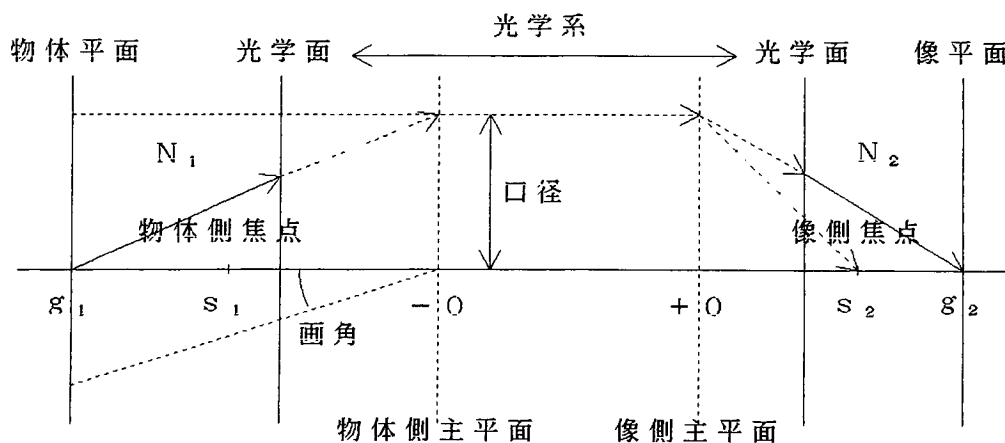


図 2-4 複数の光学面での結像

このとき物体平面中心からの光の主平面位置での入射高の2倍を口径、主平面と中心軸との交点（主点）から物体平面上での入射高を見たときの角度の2倍を画角という。口径は入射光の広がり、画角は光学系の視野にそれぞれ対応しており、これらの値が大きくなるほど光学系の設計は急激に難しくなる。

実際の光学面は、平面ではなく曲面である。そのため実際の光線は、全ての光学面を平面と近似した近軸光線とは、像平面上で異なる場所に到達する。この差を収差と呼び、収差は口径と画角の関数として表される。まず、光学面の形状を次式のようにおく（ z は光学面に対し、垂直な方向を表している）。

$$z = 1 / (2r) \cdot h^2 + 1 / 8 \cdot (1 / r^3 + a) \cdot h^4 + 1 / 16 \cdot (1 / r^5 + b) \cdot h^6 \quad (2-1-2.f)$$

入射高 h に対して8次以上の項は、ここでは考えないことにする。式(2-1-1.a)との関係は次のようになっている。

$$\begin{aligned} r &= -1 / c \\ a &= -(s-1) \cdot c^3 \\ b &= -(s^2-1) \cdot c^5 \\ h &= \sqrt{x^2 + y^2} \quad \text{ただし } u = e = 1 \end{aligned} \quad (2-1-2.g)$$

式(2-1-2.f)で与えられる各面を通過する光と、近軸主光線との像平面位置での位置の違い Δx , Δy は半口径 R 、半画角 ω の関数として次のように級数展開される。

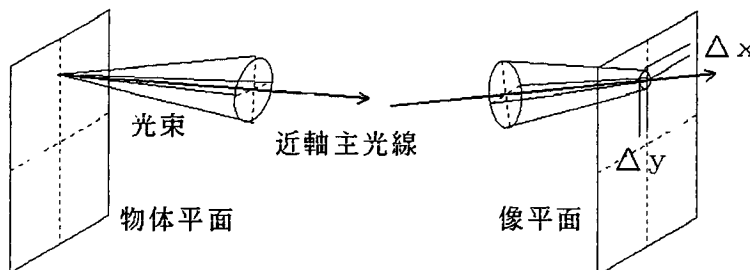


図2-5 近軸主光線を基準とした像平面上での位置

$$\Delta x \text{ or } \Delta y = \sum_{n=0}^1 f_{n,1-n} R^n \Omega^{1-n} + \sum_{n=0}^3 f_{n,3-n} R^n \Omega^{3-n} + \sum_{n=0}^5 f_{n,5-n} R^n \Omega^{5-n}$$

ただし $\Omega = N_1 \tan \omega$ N_1 : 入射位置での屈折率 (2-1-2.h)

式(2-1-2.f)は h の偶数次しか含まないため Δx , Δy は奇数次だけが残りに、光学面の形状で h の n 乗の項は、像平面上での位置の R および Ω の $n-1$ 乗の項に影響を与えている（係数 f を導く公式は、Appendix A に記載）。1次の項の係数 $f_{1,0}$ と $f_{0,1}$ の内訳は以下のようである。

- $f_{1,0}$ ① defocus : 結像点と像平面とのずれの大きさ (収差ではない)。
 ② 軸上色収差 (L) : 波長による結像点の位置の変化。
 $f_{0,1}$ ① 原点の移動 : 普通は 0 (収差ではない)。
 ② 倍率色収差 (T) : 波長による倍率の変化。「色のにじみ」として現われる。

3 次の係数 $f_{3,0} \sim f_{0,3}$ は 3 次収差と呼ばれ、最もよく現われる収差である。

- $f_{3,0}$ 球面収差 (I) : 同一の光束内での、外側の光と内側の光の結像点のずれによる収差。
 $f_{2,1}$ コマ収差 (II) : 主光線に対し、光束周辺部の光の重心が一方向にずれていくことによる収差。
 $f_{1,2}$ ① 非点収差 (III) : 像平面の半径方向と、それに垂直な方向での結像点位置の違いによる収差。
 ② 像面弯曲 (IV) : 像平面が曲がることによる収差。
 $f_{0,3}$ 歪曲 (V) : 像の形が歪むことによる収差。

5 次の係数 $f_{5,0} \sim f_{0,5}$ は 5 次収差と呼ばれ、3 次収差のように形態によって分類され、それぞれ名前が付けられている。普通、3 次収差に比べて影響が小さいので、5 次収差は無視して計算を行なうが、光学系の設計が進むにつれてこれらの収差も顧慮していかなければならない。ここでは分類上の名前だけを挙げておく。

- | | |
|-----------------------|--------------------|
| $f_{5,0}$ 輪帯球面収差 | $f_{2,3}$ ① 矢状収差 |
| $f_{4,1}$ ① 輪帯コマの付加収差 | ② コマ付加収差 |
| ② 輪帯コマ収差 | ③ 周辺コマ収差 |
| $f_{3,2}$ ① 球面収差の付加収差 | $f_{1,4}$ ① 周辺非点収差 |
| ② 羽根状収差 | ② 周辺像面弯曲 |
| ③ 周辺球面収差 | $f_{0,5}$ 周辺歪曲 |

物体平面上の異なる場所から出た光束一つ一つが広がっているところに置かれる光学面ほど、口径に関係した収差 (軸上色収差・球面収差など) に影響を与え、それらの光束が別々に別れている所に置かれた光学面ほど、画角に関係した収差 (倍率色収差・非点収差・像面弯曲など) に影響を与える。

光路追跡プログラムでは、式 (2-1-1.a) で与えられた光学面より、式 (2-1-2.g) で級数展開し、近軸計算と収差公式を用いて式 (2-1-2.h) を算出している。全収差に対する各収差の寄与は、収差係数 f を表示するよりも、 R 、 Ω 等を掛けて現実的な大きさとした方が分かりやすい。それらの値に様々な重みを掛け、 n 乗和の $1/n$ 乗を計算し、それを全体の収差の評価値として集束の判定を行なった。

2-2. 装置の光学設計

OHSは、地球大気が放射するOH夜光輝線を取り除く装置である。これらの輝線は非常に強く数も多いが、一つ一つの輝線幅はほぼ0であるとみなしてよく、高い波長分解能で調べれば調べるほど輝線の形は鋭くなるので、輝線の影響を受けない部分が多くなっていく。OH夜光輝線は、H band (1.5~1.8 μm)・J band (1.12~1.35 μm)で合計200本弱(非常に弱いものや接近した2重線を顧慮すると、700本近くになる)存在し、OHSはこれらの輝線以外の部分が十分に残る程度の、高い波長分解能が必要である。ここでは、まず分光器の概論を述べ、OHSの装置設計方針へと進めていく。

2-2-1 分光器概論

分光器は、細長い窓(スリット)から入ってきた光を、波長別にずらして結像させる装置である。レーザーの様なある特定の波長しか持たない光源に対し、分光器はスリットで像を一つだけつくる。このスリット再生像の大きさを spectral element という。重なりあっていない隣同士の element は、波長に関しての情報が混ざらないので、その分の波長差が分解できる最小の波長差であると考え、入射光の波長をこの波長差で割った値を、分光器の分解能と呼ぶ。現在、近赤外で使用されている分光器の波長分解能は、低いもので数十から高いもので数千(一万を超えるものもできつつあるが)で、可視光の分光器に比べてまだ一桁ほど低い。

分光器の構造は、スリットから入射した光を、コリメータと呼ばれるレンズまたはミラーで平行光線にし、次に波長分散のかかる光学素子(分散素子という)を通して波長別に進む方向を変え、最後にカメラと呼ばれるレンズまたはミラーで集光し結像させる(分散素子を平行光線の中に置くのは、軸上色収差を抑えるためである)。分散素子には、ブ

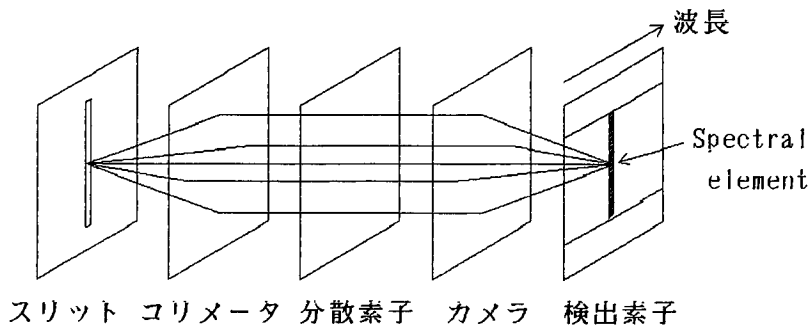


図2-6 分光器の構成要素

リズム・グレーティング(回折格子)・グリズム(プリズムの表面がグレーティングのようになっていて、プリズムよりも高い波長分解能が得られる)等が存在し、要求される波長分解能の違いによって、使用する素子が決定される。グレーティングやグリズムは高い波長分解能が得られるが、異なる次数の光が混ざってしまうので、フィルターを用いて不要な光を取り除くことが必要となる。また、グレーティングやグリズムの表面は、光の損

失をできるだけ低く抑えるために、鏡面のように研磨された階段状の格子になっており、その一つ一つの面はブレードと呼ばれる。グレーティングの形状は、このブレードが表面に対してなす角度（ブレード角）と、ブレードに対して垂直に入射する場合、最も強められる1次光の波長（ブレード波長：ブレード間の段差の大きさの半分）で与えられ、ブレード波長の光に対しては、光路差によって光が強められるのと同時に、反射の法則が満たされており、高い効率が得られるようになっている（この状態から離れるほど、光の損失は大きくなる）。

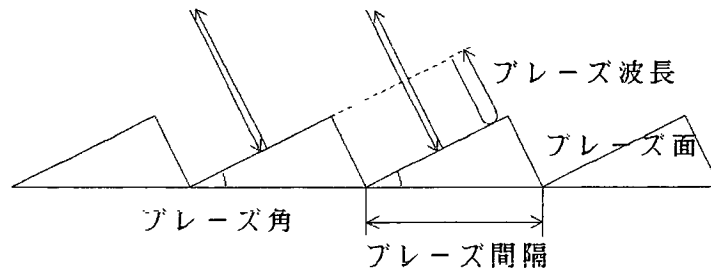


図2-7 グレーティング表面の構造

OHSは、光の損失や色収差などを考えて、グレーティングを用いた反射光学系で設計することにした。この場合、限られたいくつかの要素だけで原理的な波長分解能が決定されてしまう。ブレード間隔を x 、入射光の波長を λ 、グレーティングへの入射角と出射角をそれぞれ i 、 r とすると、 m 次の光が強め合う条件は、

$$x (\sin i - \sin r) = m \lambda$$

ここで、 λ の微小変化に対する r の変化は、

$$-x \cos r \cdot \Delta r = m \cdot \Delta \lambda$$

次に、ブレード角を θ 、ブレード波長を Λ とするとブレード間隔 $x = \Lambda / (2 \sin \theta)$ と表されるので、上式は次のようになる。

$$-\Lambda / (2 \tan \theta) \cdot \Delta r = m \cdot \Delta \lambda$$

グレーティングを理想的な使用状態で用いる場合、 $i \sim r \sim \theta$ 、 $m \lambda \sim \Lambda$ であり、スリット・コリメータ間の距離を L 、スリット幅を s とすると、分光器の波長分解能は、2つの spectral element が分解される状態、すなわち $\Delta i \sim \Delta r \sim s / L$ の時なので

$$-\Lambda / (2 \tan \theta) (s / L) = m \cdot \Delta \lambda \quad \text{より、} \\ \lambda / \Delta \lambda = 2 (L / s) \tan \theta \quad (2-2-1.a)$$

この結果は、グレーティングを用いた分光器の場合、理論的な波長分解能はスリット・コ

リメータ間の距離 L 、スリット幅 s 、ブレイズ角 θ のみによって決定されることを示している。つまり、分光器の波長分解能を大きくするには、①装置を大型化する、②グレーティングのブレイズ角を大きくする、③スリット幅を狭くする、という3つの方法しかない。 L が決まれば、コリメータミラー（レンズ）の形状が決まり、検出素子の大きさでカメラミラーの形状が決まる（検出素子に納まるような拡大率にする）、という順序で設計は進められる。光学素子にミラーを用いるかレンズを用いるかは重要な問題で、ミラーは色収差がなく光の損失が少ないが、光学面に対して斜めに入射させなければならない（例外はあるが）ため収差が残りやすく、また、反射角をあまり大きくとれない都合上、一般的にレンズを用いた場合より光学系の配置に大きな場所が必要であるのに対し、レンズは光学面に対し垂直に光を入射させることができ、一直線上に光学素子を並べられるので、幾何学的な収差を抑え、小さいスペースに光学系を配置することができるが、色収差があるのであまり広い波長範囲で使用することができないことと、光透過面での反射による虚像や光の損失等が問題となる。最近、反射防止膜が発達し、レンズを用いた光学系でも光の損失は少なくなったが、ミラー・レンズどちらを用いるかは慎重に判断をするべき問題である。

2-2-2. OHSの光学設計

ハワイ大2. 2m望遠鏡のカセグレイン焦点は、赤外用副鏡を用いた場合 $F/31$ で入射する。この場合、望遠鏡の焦点距離は $220 \times 31 = 6820 \text{ cm}$ である。カセグレイン焦点で、 1 mm はどのくらいの角度に相当するかを計算すると、

$$\begin{aligned} 0.1 / 6820 \text{ rad} &= 180 / \pi / 68200 \text{ deg} \\ &= 3600 \times 180 / \pi / 68200 \text{ arcsec} \\ &= 3.0 \text{ arcsec} \end{aligned}$$

スリット幅は、シーイング（大気による星のゆらぎ）や望遠鏡の天体追尾性能などを考えて、最低でも 1 arcsec 程度は必要である。また、高い波長分解能を得るためにはスリット幅は狭い方が良いので、妥当な幅として 1.5 arcsec (0.5 mm) を採用した。この場合、波長分解能を 5000 程度にするために必要なスリットとコリメータ間の距離 L は、式(2-2-1.a)より

$$L = 5000 \times 0.5 / 2 / \tan \theta = 1250 / \tan \theta$$

θ の値が大きいほど装置を小さく (L を小さく) することができるが、その場合、グレーティングに入射する光が広い角度にわたって分散し、光を多く損失すると考えられるので θ はできれば小さい方が良い。 L の値として 2000 mm 程度を考えると、 $\theta = 32^\circ$ となる。

次に問題となるのが、カメラミラーとOH夜光マスクの形状である。一枚のカメラミラーで集光しようとする場合、凹面鏡で集光することになるが、収差論より像面彎曲は凹面と凸面両方を用いた光学系でなければ除くことはできないので、結像面を平面にすること

は事実上不可能に近い。OHSは一度高分散像を結像させた後、逆順に配置した光学系を用いて元の状態に戻す必要があるため、結像面を境とした対称性が最も重要な要素となる。よって、像面弯曲が存在する場合、対称性を維持して元に戻す方法として、①赤外用ファイバーを弯曲した像面に沿って並べ、逆の光学系に導く ②像面の弯曲と同じ形状のミラー（マスクミラー）を用い、反射して元に戻す この2つの方法が考えられるが、①は現在のファイバーの性能などから考えて、あまり良い方法とは言えないので、以後②のみについて考えていくこととする。カメラミラーの形状として一般的なものは放物面と球面であるが、それぞれの場合に対して像面の形状がどのようなようになるかを計算してみると、下図の様になった。

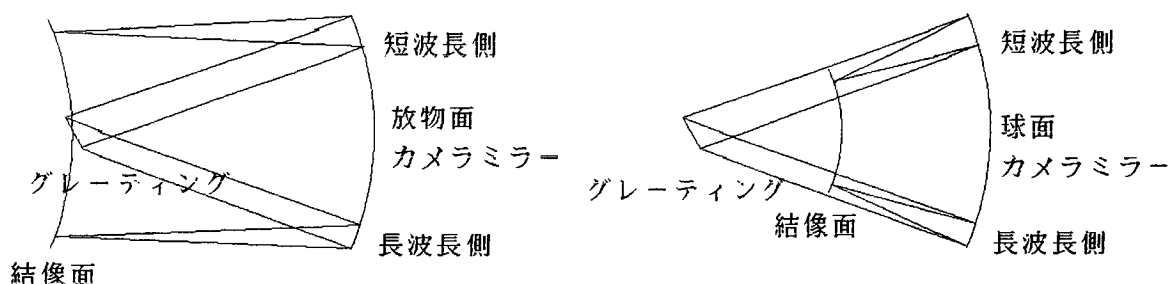


図2-8 球面カメラと放物面カメラでの結像面の位置

放物面を用いた場合、像面の弯曲に対し垂直に光が入射していないので、対称性を維持するためには曲面を階段状の多数の平面で近似し、入射光を同じ方向に反射する必要がある。像の精度は中心では非常に良いが、像面の両端に近づくとつれコマ収差が大きく現われる。しかし、コマ収差は対称性により除去されてしまうので、逆の光学系で元の状態に戻されたときには完全になくなり、最終的な像は非常によい像が得られる。

球面を用いた場合、カメラミラーの曲率中心をグレーティングの中心と一致させれば、像面弯曲の曲率中心も一致し、結像面に対して光が垂直に入射する理想的な状態となる。しかしこの場合、全ての像に球面収差が発生し、逆の光学系でその球面収差は更に増幅されてしまうので、この球面収差の大きさが球面カメラミラーを用いた場合に、最も注意すべき事柄となる。ハワイ大2.2m望遠鏡に取り付ける装置の場合、球面カメラミラーを用いた場合の球面収差はあまり大きくなく、高い波長分解能を維持することができたので、この方式を採用することにした（しかし、すばる8m望遠鏡に対するOHSの場合、球面収差は非常に大きくなり、この方式での設計は非常に困難なものとなる。6-1.参照）。

弯曲した結像面には、OH夜光を取り除くためのマスクミラーが置かれるが、ここで注意すべきことは、そのまま逆方向に反射すると入射光と出射光が全て同じ経路を通過してスリット位置まで戻るため、2つの光線が分離できないことである。そのためマスクミラーで反射する際に、入射光束と出射光束が分離する程度に、波長分散方向に対し垂直な方向へ反射するか、90°の角度で向き合った三角溝状ミラーで反射する（この場合、再び結像するスリット位置で入射光と出射光が分離できる）しかない。後者の場合、マスクミラーは2つの円錐台を張り合わせたような形状で、かつOH夜光マスクは扇型の様なものとなるので製作が難しいことと、グレーティングとカメラミラーの間にマスクミラーが位

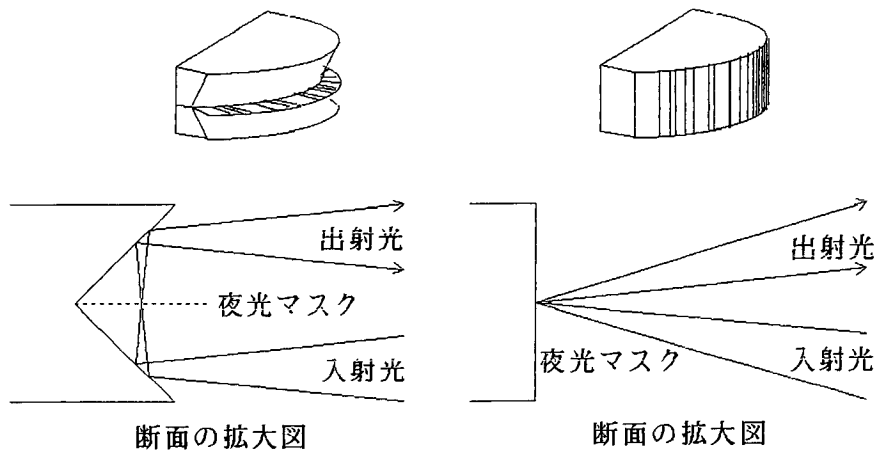


図 2 - 9 2つのタイプのマスクミラー

置するため、光束のかなりの部分が遮断され光の損失が大きいことが考えられるので、前者の垂直方向にはね上げる方式を採用することにした。この方式を用いた場合、マスクミラー上での球面収差はやや大きくなるが、ハワイ大2. 2 m望遠鏡に対してのOHSでは、像のボケの大きさは $20\mu\text{m}$ 程度であり、スリット像の幅 $250\mu\text{m}$ に対して十分小さかったので、特別な形状のミラーを用いなくても設計を進めることができた。

マスクミラーで反射した後は、同じカメラミラーとグレーティングを用いて光を元の状態に戻し、プリズムで緩く分散をかけてリフォーカスミラーにより $F/10$ で集光をし、赤外線カメラに導く。この装置はカセグレイン焦点に取り付けるため取り付け方法に制限があり、また、赤外線カメラは非常に大きく、光路から離して配置しなければならないので、そのための平面鏡を3枚追加して光学設計は終了した。全体の光路図を図2-10に、各焦点面での結像の様子を図2-11~13に示す。第一平面鏡は、スリット部分を可視光の小型暗視カメラでモニタするため、赤外線の反射率は高いが、可視光はかなりの割合で透過する金薄膜ダイクロイックミラーを用いた。また、プリズムは回転ステージにより平面鏡と交換でき、波長分散をかけない測光観測も可能である。赤外線カメラは赤外線検出素子 NICMOS3 と4枚のレンズ、数十種類のフィルタが真空の容器(クライオスタット)の中に入れており、内部は液体窒素で 77K に冷却されている装置で、入射 $F/10$ ・最終 $F/10$ の1:1光学系と、入射 $F/10$ ・最終 $F/5$ の2:1光学系の選択ができる。この赤外線カメラは 40kg 以上と非常に重い、微小移動するステージに固定され、焦点合わせが行えるように設計した(4-1. 参照)。

ハワイ大2. 2 m望遠鏡に対するOHSの、設計段階での仕様は以下のとおりである。

装置寸法	2. 4 m × 1. 2 m × 0. 8 m
総重量	250 kg (NICMOS3 赤外線カメラを含む)
スリットの大きさ	0. 5 mm × 20 mm (1.5arcsec × 60arcsec)
F比	31 (入射) → 10 または 5 (検出器上)
波長分解能	$\lambda / \Delta \lambda \sim 5500$ (マスクミラー上)、100 (検出器上)

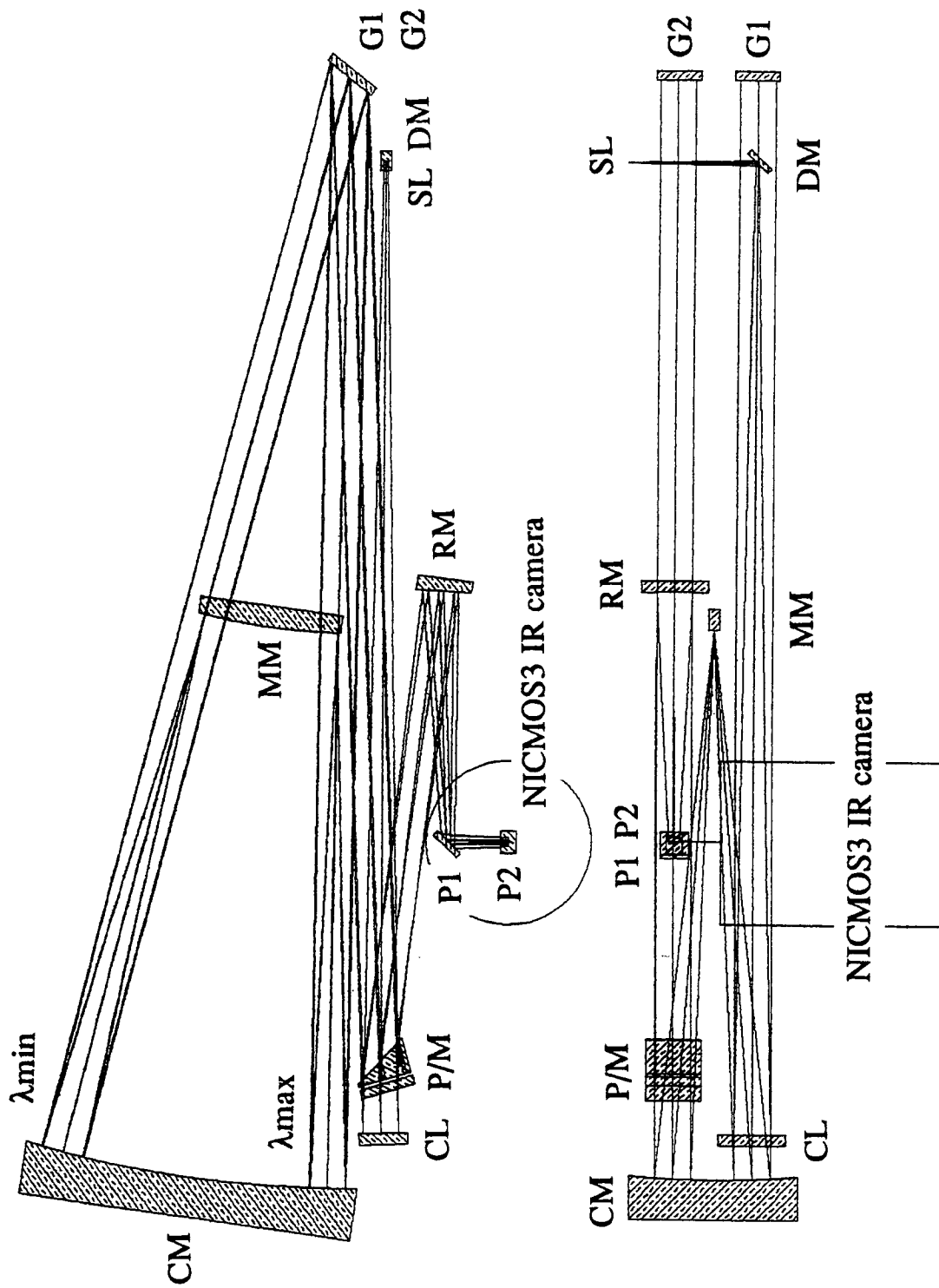


図 2-10 ハワイ大2. 2 m 望遠鏡に対する OHS の光学設計図
各光学素子の名称と、光の反射経路は表 2-1 (次項) 参照

OHSの光学設計結果は表2-1のとおりである。ox, oy, oz は光学面中心の座標、ot, op, oq はz軸方向からの光学面の回転角、c, sは形状パラメータ（ただしu = e = 1、2-1. 参照）である。

No. 記号

- 0 SL 入射スリット (60"x60"、1" 5x60"、0".9x60"、Pin hole、Close の選択が可能)
 - 1 DM 平面鏡 (ダイクロイックミラー)
 - 2 CL コリメータ (放物面鏡、曲率半径 4 m)
 - 3 G1 グレーティング (ブレイズ波長 4.9876 μm ブレイズ角 35°)
 - 4 CM カメラミラー (球面鏡、曲率半径 2 m)
 - 5 MM マスクミラー (凸球面鏡、曲率半径 1 m)
 - 6 CM カメラミラー (No. 4 と同一の鏡)
 - 7 G2 グレーティング (No. 3 と同じ仕様のもの)
 - 8 ┌ プリズム入射面
 - 9 P/M 反射面
 - 10 └ プリズム出射面 (No. 8 と同じ)
- ┌ プリズム (材質 BK 7、頂角 30°)
└ 背面には平面鏡が置かれ、回転ステージにより交換することが可能。
- 11 RM リフォーカスミラー (放物面鏡、曲率半径 1.3 m)
 - 12 P1 平面鏡
 - 13 P2 平面鏡 (上記各光学素子の詳細は 4-1. 参照)
 - 14 結像面

No.	ox (cm)	oy (cm)	oz (cm)	ot (deg)	op (deg)	oq (deg)	c (cm ⁻¹)	s
0	0.0000	-16.0000	23.0000	-90.0000	0.0000	0.0000		
1	0.0000	7.0000	23.0000	45.0000	0.0000	0.0000		
2	6.9799	7.0000	199.8782	0.0000	182.0000	0.0000	2.5000e-3	0.0000
3	-6.6986	7.0000	8.2388	0.0000	-37.8496	0.0000		
4	-34.7976	0.0000	208.1739	0.0000	172.0000	0.0000	4.9529e-3	1.0000
5	-20.7584	0.0661	108.2794	0.0000	-8.0000	0.0000	-1.0000e-3	1.0000
6	-34.7976	0.0000	208.1739	0.0000	172.0000	0.0000	4.9529e-3	1.0000
7	-6.6986	-7.0000	8.2388	0.0000	-37.8496	0.0000		
8	-0.4444	-7.1361	187.3351	0.0000	226.3000	0.0000		
9	0.5763	-7.1362	190.3789	0.0000	196.3000	0.0000		
10	-0.2398	-7.1362	187.1210	0.0000	46.3000	0.0000		
11	20.0000	-7.0000	100.0000	0.0000	-6.7834	0.0000	7.6923e-3	0.0000
12	11.7450	-7.0019	147.0000	0.0000	135.9427	0.0000		
13	23.0000	-7.0010	147.2881	-90.0000	-45.0000	0.0000		
14	23.0000	-0.7647	147.2881	90.0000	0.0000	90.0000		

表 2-1 OHS 光学パラメータ

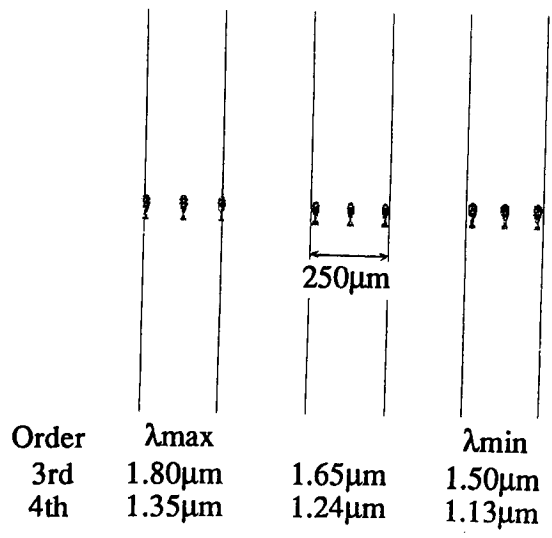


図2-11 マスクミラー上での像
スリット中央部3点より入射した光の、マスクミラー上での結像の様子。縦線の間隔は250 μm で、スリット像の幅に相当する。スリットの長さ方向では像の大きさはほとんど変化しない。グレーティングの3次がHバンド、4次がJバンドの光である。

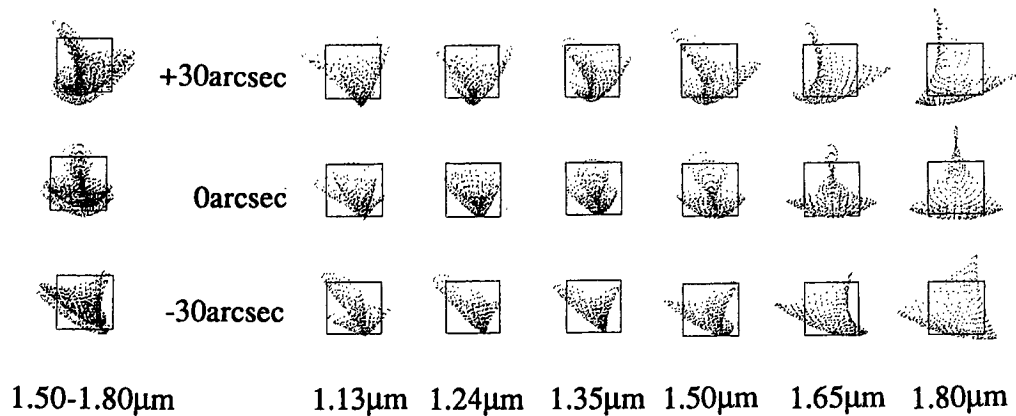


図2-12 OHS結像面での像
スリット両端及び中央からの光のOHS結像面（赤外線カメラ入射面）での結像の様子。左端はプリズムを用いない場合のものである。正方形の一辺は40 μm の大きさである。

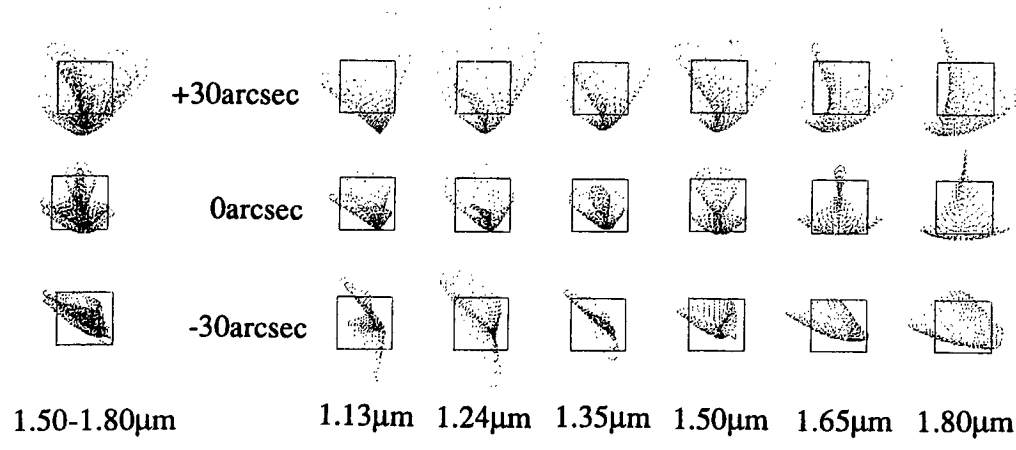


図2-13 検出素子上での像
赤外線カメラ（1:1光学系使用）を通した検出器上での結像の様子。正方形の一辺は40 μm （検出器の一素子の大きさ）。赤外線カメラのレンズ系を通ることにより、結像状態はやや悪くなる。

第 3 章

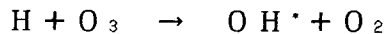
3 目標性能

3-1. 夜光除去率と透過効率

OHSを用いた観測では、強いバックグラウンドであるOH夜光が大幅に減らされるかわりに、従来の観測法と比べて、光が数多くの光学面を余分に通過することとなるので、光の損失量も大きい。すなわち、夜光を除去することによって得られる効果から、光の損失によって失われる部分を取り去った残りが、OHSの真の効果となる。そのためには、夜光除去率・透過効率共に、できるだけ高くする必要がある。ここでは、夜光除去率・透過効率を予測するために必要な、OH夜光の観測と反射率測定に関して記述する。

3-1-1. 夜光輝線

大気の発する夜光輝線は、1950年 Meinel (Minel 1950) によって初めて同定され、大気上層部に存在するOHラジカルの振動・回転遷移であることが明かとなった。OHラジカルは以下の反応により水素原子とオゾンより生成される (Llewellyn et al. 1978)。



生成されたOHラジカルは振動準位 $v = 6 \sim 9$ に励起されており、次々と下の準位に遷移する事によって輝線を放射する。各振動準位は、回転準位 J によって細かく分かれており、 $\Delta J = +1, 0, -1$ の遷移はそれぞれ P branch, Q branch, R branch と呼ばれる。更に各準位はスピン・軌道 (または回転) の相互作用により2つに分かれており、それぞれの遷移は、パリティの違いにより非常に間隔の狭い2つの輝線のペア (Λ -doublet) として放射されている。各準位のレベルは、Coxon らが実験室での可視光の範囲での精密な測定値をもとに、Hamiltonian Model を用いて決定した (Coxon 1980, Coxon and Foster 1982)。

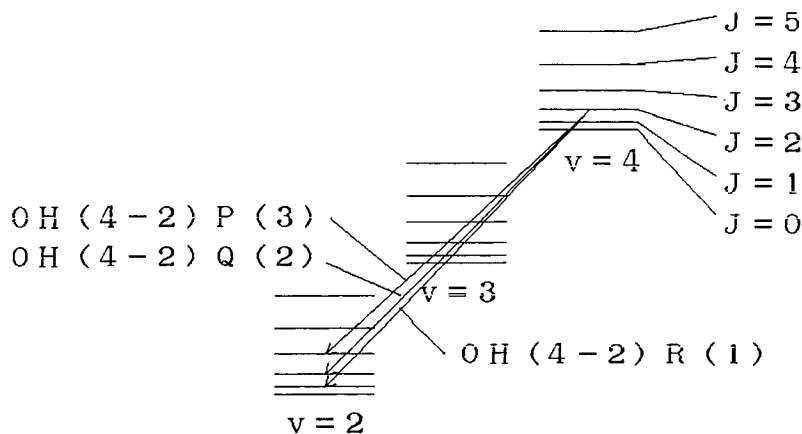
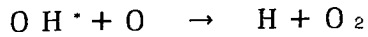


図3-1 OHラジカル(2原子分子)の輝線放射のしくみ

また、OHラジカルは酸素原子とも反応し、励起された酸素分子を生成する (Llewellyn et al. 1978)。



この反応により励起された酸素分子は、波長 1.269, 1.280, 1.580 μm 付近で数多くの輝線を放出する。これらのOH夜光輝線は回折格子を用いた分光器や干渉分光計等を用いて多くのグループによって観測されており (Harrison and Kendall 1973, Steed and Baker 1979, Pendleton et al. 1989, Oliva and Origlia 1992, Maihara et al. 1993 など)、全般に於て Coxon らのモデルを支持する結果が得られているが、部分的に異なった波長の輝線が観測されているものや、各輝線の強度比はどの観測でも精度良くは測定されていない。図3-2に Steed らが測定したOH夜光スペクトルを示す。 $v=6\sim 9$ に励起されたOHラジカルは、 $\Delta v=2$ でH・Kバンドに、 $\Delta v=3$ でJバンドに輝線を放出し、特に、Q branch ($\Delta J=0$)、P branch ($\Delta J=+1$)に強い輝線が出ていることがわかる。

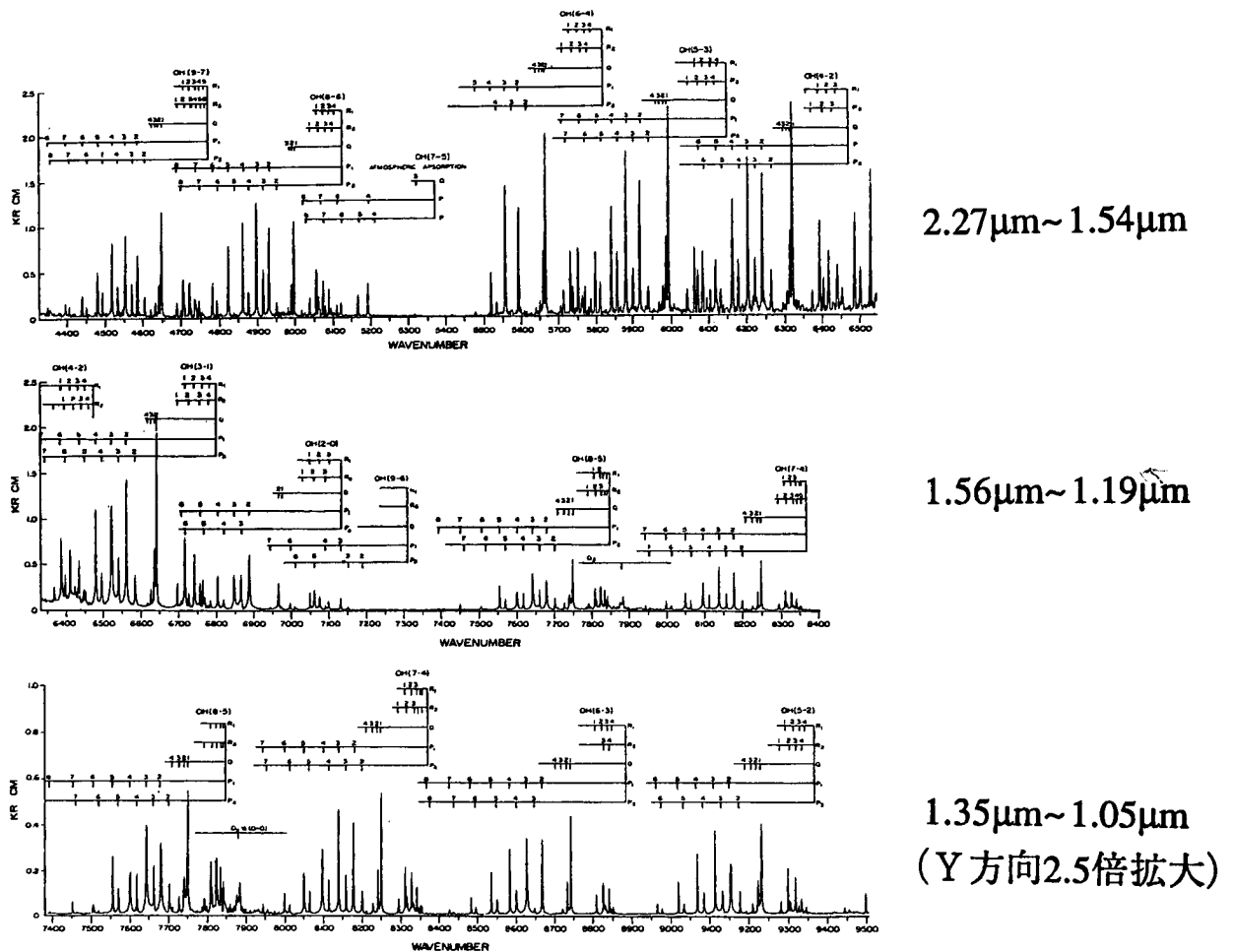


図3-2 J・HバンドでのOH夜光スペクトル

OH夜光は、上空約80～100 kmで発生するが、発生した場所での密度・温度等の違いにより、日によって大きく強度が変化する。また、gravity wave (Yu et al.1980) と呼ばれる周期的な密度・温度のゆらぎが一定速度で移動していくために、10分程度の短い周期でも時間変動をする。Taylor ら (Taylor et al.1987) によると、gravity wave の波長は26 km、移動速度は38 m/sで、11.4分かけて密度ゆらぎが移動していくが、この様子は最近 Ramsey ら (Ramsey et al.1992) によっても観測され、これらの数値を支持するような結果が得られている。

我々はOHSを製作するにあたり、ハワイ大2.2m望遠鏡クーデ分光器を用い、1991年1月・7月と1992年2月の3度にわたって、OH夜光の高分散分光観測を独自に行なった。それぞれの観測の概要は表3-1、3-2のとおりである。

入射F	33.6		
コリメータミラーの焦点距離	6.71 m		
カメラミラーの焦点距離	1.22 m		
出射F	6.11		
グレーティング	ブレード密度	ブレード波長	ブレード角
2A	600本/mm	1.32 μm	24.0°
3A	400本/mm	1.22 μm	14.7°

表3-1 ハワイ大2.2mクーデ分光器 (No.3 Camera 光学系使用、ブレード波長は直入射で使用の場合、1.36 μm・1.27 μm である)

観測日	スリット幅	グレーティング	波長分解能	観測内容
1991/1/24-26	0.3 mm 1.2 mm	2A	20000 5000	一部分の詳細観測 同上
1991/7/24-25	1.0 mm 2.3 mm	3A	3500 1500	J・Hバンド全体を観測 輝線間の連続成分を観測
1992/2/8	1.0 mm 2.0 mm	3A	3500 1800	波長帯端部分の追加観測 輝線間の連続成分を観測

表3-2 OH夜光観測の概要 (波長分解能は2-2-1.a式より算出)

検出装置には NICMOS3 赤外線カメラを用いたが、No.3 Camera 光学系を用いた場合、出射 F は 6.11 と明るいので、凹レンズで F/6 を F/10 に変換し、赤外線カメラに導いた。図 3-3 に第一回目の観測で得られた高分解能の Q branch スペクトルを示す。波長分解能は、F 変換レンズの収差や焦点の調整不良等が原因で、16000 程度と考えられるが、微細構造は認められなかった。また、夜光スペクトルマスク製作には、波長分解能 5000 以上 ($\pm 1.5 \text{ \AA}$ 以下) の情報が必要であるが、通常、単独で存在する輝線の中心波長決定精度は、計算上での波長分解能より数倍良くなるので (単独の輝線の場合、波長分解能が低いことによって輝線自体は広がっても、強度の中心は輝線の形から精度良く決定できるため)、3500 の波長分解能で観測を行なった。しかし、この観測で得られたデータは、別の装置による過去の観測データと一致しない部分がやや存在し、波長決定精度に若干問題のあるものとなった。その原因として、以下の事が考えられた。

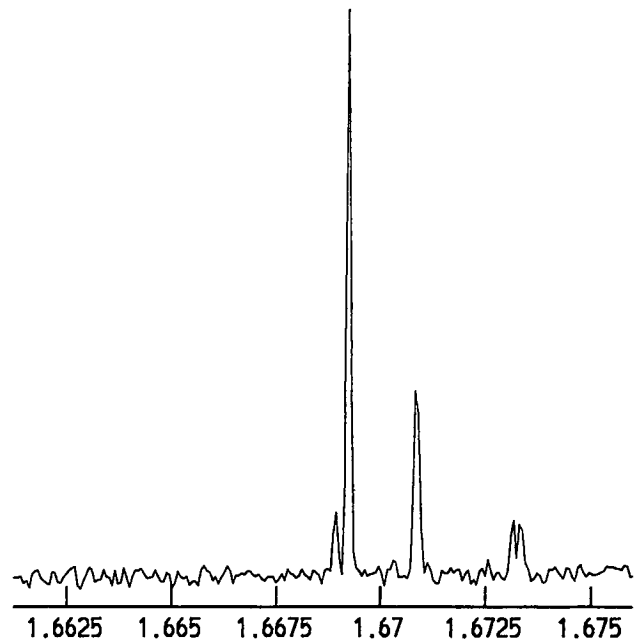


図 3-3 OH 夜光 (Q branch)

- ① 波長決定のために用いた比較光源中の輝線の数少なく、比較光源の輝線が一つも確認できないフレームが何枚か存在し、それらを隣のフレームとつなげた際に誤差が生じた可能性がある。
- ② NICMOS3 camera の歪曲の補正が困難であったため、その補正をしていない。歪曲による誤差は、光路追跡計算によると最大で $\pm 1 \text{ \AA}$ 程度と予想される。
- ③ 検出器に多数の不良素子 (bad pixel) や波長更正用の強い Ar ランプの残像が存在し、その補正の際に輝線の中心が移動 (最大で $\pm 1 \text{ \AA}$ 程度) した。
- ④ 夜光スペクトルの強度比は観測時間や日によって変化し、予想された強度以下で観測できなかった輝線が存在した。

J・H バンド全域での夜光輝線の同定は、上記の理由によりこの観測結果だけによらず、他の観測データとも比較して、総合的に行なった (Appendix B 参照)。また、 O_2 の輝線に関しては精密な観測結果を入手することができなかったため、我々の観測結果のみを用いて判断した。現在の夜光マスクの設計に用いた夜光輝線に関するデータを表 3-3 に示す。大部分の数値は Steed ら (Steed and Baker 1979) によるものであるが、部分的に我々の観測データと Oliva ら (Oliva and Origlia 1992) のデータを用いている (強度の単位は kR : $1 \text{ kR} = 10^9 \text{ photon/s/cm}^2/\text{Sr} = 0.235 \text{ photon/s/cm}^2/\text{arcsec}^2$ であるが、日によって大きく変化するので大体の目安と考えるのがよい)。

種別	波長 (μm)	強度
OH (6-3) R ₁ (3)	1.13134	0.12
OH (6-3) R ₁ (2)	1.13314	0.15
OH (6-3) R ₁ (1)	1.13544	0.10
OH (6-3) Q ₁ (1)	1.14399	0.40
OH (6-3) Q ₁ (2)	1.14516	0.18
OH (6-3) P ₁ (2)	1.15395	0.32
OH (6-3) P ₂ (3)	1.15665	0.02
OH (6-3) P ₁ (3)	1.15925	0.35
OH (6-3) P ₂ (4)	1.16285	0.12
OH (6-3) P ₁ (4)	1.16515	0.30
OH (6-3) P ₂ (5)	1.16965	0.08
OH (6-3) P ₁ (5)	1.17165	0.20
OH (6-3) P ₂ (6)	1.17715	0.04
OH (6-3) P ₁ (6)	1.17875	0.08
OH (6-3) P ₁ (7)	1.18646	0.02
OH (7-4) R ₂ (5)	1.19735	0.06
OH (7-4) R ₁ (4)	1.19758	0.06
OH (7-4) R ₂ (4)	1.19833	0.04
OH (7-4) R ₁ (3)	1.19886	0.14
OH (7-4) R ₂ (3)	1.20016	0.12
OH (7-4) R ₁ (2)	1.20076	0.20
OH (7-4) R ₂ (2)	1.20256	0.18
OH (7-4) R ₁ (1)	1.20316	0.24
OH (7-4) R ₂ (1)	1.20559	0.07
OH (7-4) Q ₁ (1)	1.21226	0.54
OH (7-4) Q ₁ (2)	1.21359	0.20
OH (7-4) Q ₁ (3)	1.21550	0.05
OH (7-4) P ₂ (2)	1.21964	0.11
OH (7-4) P ₁ (2)	1.22293	0.40
OH (7-4) P ₂ (3)	1.22578	0.18
OH (7-4) P ₁ (3)	1.22870	0.46
OH (7-4) P ₂ (4)	1.23259	0.17
OH (7-4) P ₁ (4)	1.23516	0.30
OH (7-4) P ₂ (5)	1.24009	0.11
OH (7-4) P ₁ (5)	1.24230	0.19
OH (7-4) P ₂ (6)	1.24827	0.04

種別	波長 (μm)	強度
OH (7-4) P ₁ (6)	1.25024	0.09
OH (7-4) P ₁ (7)	1.25891	0.05
O ₂	1.26841	0.08
O ₂	1.26883	
	~1.27003	0.35
O ₂	1.27083	0.05
O ₂	1.27251	0.07
O ₂	1.27450	0.08
OH (8-5) R ₁ (5)	1.27480	0.07
OH (8-5) R ₁ (4)	1.27528	0.15
OH (8-5) R ₂ (4)	1.27611	0.10
OH (8-5) R ₁ (3)	1.27644	0.21
OH (8-5) R ₂ (3)	1.27772	0.10
OH (8-5) R ₁ (2)	1.27825	0.24
O ₂	1.27951	0.07
OH (8-5) R ₂ (2)	1.28016	0.11
OH (8-5) R ₁ (1)	1.28070	0.23
O ₂ ?	1.28245	0.07
OH (8-5) R ₂ (1)	1.28346	0.08
O ₂ ?	1.28448	0.08
O ₂ ?	1.28660	0.07
OH (8-5) Q ₁ (1)	1.29057	0.57
OH (8-5) Q ₁ (2)	1.29212	0.17
OH (8-5) Q ₁ (3)	1.29431	0.09
OH (8-5) P ₂ (2)	1.29857	0.15
OH (8-5) P ₁ (2)	1.30216	0.32
OH (8-5) P ₂ (3)	1.30528	0.21
OH (8-5) P ₁ (3)	1.30852	0.39
OH (8-5) P ₂ (4)	1.31278	0.18
OH (8-5) P ₁ (4)	1.31567	0.19
OH (8-5) P ₂ (5)	1.32110	0.10
OH (8-5) P ₁ (5)	1.32366	0.27
OH (8-5) P ₂ (6)	1.33019	0.01
OH (8-5) P ₁ (6)	1.33247	0.04
OH (8-5) P ₁ (7)	1.34208	0.06

種別	波長 (μm)	強度
OH (2-0) P ₂ (7)	1.50067	0.34
OH (2-0) P ₁ (7)	1.50261	0.51
OH (3-1) Q ₂ (1)	1.50528	0.99
OH (3-1) Q ₁ (1)	1.50555	6.45
OH (3-1) Q ₂ (2)	1.50640	0.33
OH (3-1) Q ₁ (2)	1.50689	2.67
OH (3-1) Q ₁ (3)	1.50882	1.08
OH (3-1) Q ₁ (4)	1.51137	0.39
OH (3-1) P ₂ (2)	1.51870	1.98
OH (3-1) P ₁ (2)	1.52410	4.65
OH (3-1) P ₂ (3)	1.52878	2.93
OH (3-1) P ₁ (3)	1.53324	5.91
OH (3-1) P ₂ (4)	1.53953	2.73
OH (3-1) P ₁ (4)	1.54321	5.03
OH (4-2) R ₁ (5)	1.54621	0.44
OH (4-2) R ₂ (5)	1.54744	0.31
OH (4-2) R ₁ (4)	1.55008	0.97
OH (3-1) P ₂ (5)	1.55098	1.96
OH (4-2) R ₂ (4)	1.55179	0.59
OH (3-1) P ₁ (5)	1.55404	3.35
OH (4-2) R ₁ (3)	1.55462	1.73
OH (4-2) R ₂ (3)	1.55702	1.00
OH (4-2) R ₁ (2)	1.55977	2.43
OH (3-1) P ₂ (6)	1.56313	1.12
OH (4-2) R ₂ (2)	1.56316	2.56
OH (4-2) R ₁ (1)	1.56550	2.30
OH (3-1) P ₁ (6)	1.56570	1.81
OH (4-2) R ₂ (1)	1.57025	1.12
OH (3-1) P ₂ (7)	1.57603	0.53
OH (3-1) P ₁ (7)	1.57821	0.82
O ₂	1.58037	0.20
O ₂	1.58085	0.40
OH (4-2) Q ₂ (1)	1.58303	0.75
OH (4-2) Q ₁ (1)	1.58332	4.89
OH (4-2) Q ₁ (2)	1.58481	2.08
OH (4-2) Q ₁ (3)	1.58693	0.87

種別	波長 (μm)	強度
OH (4-2) Q ₁ (4)	1.58973	0.33
OH (3-1) P ₁ (8)	1.59159	0.31
OH (4-2) P ₂ (2)	1.59726	1.55
OH (4-2) P ₁ (2)	1.60308	3.67
OH (4-2) P ₂ (3)	1.60798	2.31
OH (4-2) P ₁ (3)	1.61286	4.74
?	1.61589	0.14
OH (4-2) P ₂ (4)	1.61947	2.16
OH (4-2) P ₁ (4)	1.62354	4.11
OH (5-3) R ₂ (6)	1.62797	0.20
OH (5-3) R ₁ (5)	1.63023	0.14
OH (4-2) P ₂ (5)	1.63172	1.64
OH (5-3) R ₁ (4)	1.63418	0.60
OH (4-2) P ₁ (5)	1.63513	2.83
OH (5-3) R ₂ (4)	1.63604	0.38
OH (5-3) R ₁ (3)	1.63885	1.06
OH (5-3) R ₂ (3)	1.64147	0.62
OH (5-3) R ₁ (2)	1.64421	1.43
OH (4-2) P ₂ (6)	1.64476	0.98
OH (4-2) P ₁ (6)	1.64764	1.58
OH (5-3) R ₂ (2)	1.64790	1.55
OH (5-3) R ₁ (1)	1.65023	1.35
OH (5-3) R ₂ (1)	1.65539	0.65
OH (4-2) P ₂ (7)	1.65863	0.49
OH (4-2) P ₁ (7)	1.66110	0.75
OH (5-3) Q ₂ (1)	1.66892	0.44
OH (5-3) Q ₁ (1)	1.66921	2.88
OH (5-3) Q ₂ (2)	1.67026	0.20
OH (5-3) Q ₁ (2)	1.67088	1.22
OH (5-3) Q ₁ (3)	1.67325	0.53
OH (5-3) Q ₁ (4)	1.67636	0.21
OH (5-3) P ₂ (2)	1.68405	0.90
OH (5-3) P ₁ (2)	1.69037	2.15
OH (5-3) P ₂ (3)	1.69551	1.35
OH (5-3) P ₁ (3)	1.70088	2.80
OH (5-3) P ₂ (4)	1.70783	1.35

種別	波長 (μm)	強度
OH(5-3)P ₁ (4)	1.71236	2.51
OH(6-4)R ₁ (8)	1.71753	0.10
OH(6-4)R ₁ (7)	1.71891	0.10
OH(5-3)P ₂ (5)	1.72104	1.00
OH(5-3)P ₁ (5)	1.72486	1.77
OH(6-4)R ₁ (4)	1.72829	0.41
OH(6-4)R ₂ (4)	1.73034	0.26
OH(6-4)R ₁ (3)	1.73309	0.69
OH(5-3)P ₂ (6)	1.73511	0.62
OH(6-4)R ₂ (3)	1.73597	0.39
OH(5-3)P ₁ (6)	1.73838	1.01
OH(6-4)R ₁ (2)	1.73867	0.93
OH(6-4)R ₂ (2)	1.74270	0.94
OH(6-4)R ₁ (1)	1.74499	0.83

種別	波長 (μm)	強度
OH(5-3)P ₂ (7)	1.75013	0.34
OH(6-4)R ₂ (1)	1.75060	0.41
OH(5-3)P ₁ (7)	1.75294	0.51
OH(6-4)Q ₁ (1)	1.76532	1.82
OH(6-4)Q ₁ (2)	1.76718	0.79
OH(5-3)P ₁ (8)	1.76855	0.10
OH(6-4)Q ₁ (3)	1.76984	0.35
OH(6-4)Q ₁ (4)	1.77334	0.15
OH(6-4)Q ₁ (5)	1.77771	0.08
OH(6-4)P ₂ (2)	1.78114	0.55
OH(6-4)P ₁ (2)	1.78803	1.34
OH(6-4)P ₂ (3)	1.79348	0.80
OH(6-4)P ₁ (3)	1.79940	1.80

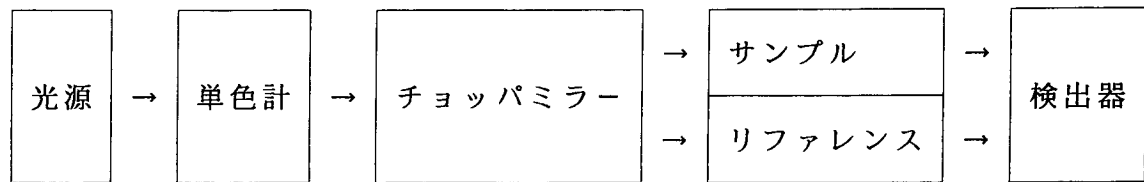
表 3-3 夜光マスクの設計に用いた夜光輝線のデータ
(詳細は Appendix B 参照)

この他の夜光分光観測として、輝線間の連続スペクトル成分の強度を測定する事を試みた。連続スペクトルは非常に弱いことが予想されたので、スリットの幅を広げ、波長分解能を低くするかわりに入射する光の量を多くし、また、クーデ室内の温度変化などの影響を最小限に抑えるため、スリットを上下二段に分割し、一方で空を、もう一方で室内を（スリットを黒い紙で隠す）交互に観測した。その結果、夜光輝線間の連続スペクトル成分は、全夜光輝線強度の2%程度であることが判明し、更に、この強度は月の影響を大きく受けることが判明した（月の影響に関しては、5-1の試験観測の部分で詳しく述べる）。この数値は、OH夜光除去率の上限を示しており、OHSの夜光除去率の目標値は1/30~1/50であるとした。

3-1-2. ミラー反射率

OHSは、11個の反射面より構成されているため、それぞれの反射率が少し下がるだけで、装置全体での光透過効率は大きく低下する。波長1~2 μm での反射率は銀が最も高く98.9%、次が金で98.2%、一般の光学鏡によく用いられているアルミニウムが94~97%であるが、金以外は空気中で徐々に劣化し反射率が下がるので、OHSには当初、金蒸着ミラーを用いた（その後、銀の劣化はそれほど深刻でないことが確認されたので、現在はほぼ全て銀蒸着ミラーを用いている）。それと同時に、試験用の小型の銀蒸着ミラーを同じ状態で放置し、数カ月経過後の銀の劣化による反射率の低下を調べるこ

とにした。測定は1992年12月と1993年5月の2回、国立天文台の島津製UV3100-PCを用いて行なった。この装置は典型的な赤外分光光度計で、図3-4に装置



単色計は、特定の波長の光だけを選別する装置で、入射・出射両方にスリットを持つ分光器である。単色計で選別された光は、チョッパミラーにより50Hzでサンプルとリファレンスに振り分けられ、同一の検出器に再び集められる。

図3-4 赤外分光光度計の概念図

概念を示す。出力は、サンプル/リファレンスの値として得られるため、絶対的な値を直接測定することはできないが、新品の銀ミラーに対する比を求める（サンプル部分に、測定したいミラーと新品の銀ミラーを交互に置き測定することにより、反射率を推定することにした。2度の測定により得られた結果をまとめると、

- ①新しい金ミラーの反射率は97%強である。
- ②金ミラー・銀ミラー共に、装置に取り付けてから半年後に測定したものは、1%程度反射率が低下していた。
- ③ダイクロイックミラー（特定の波長より長い波長の光だけを反射するミラー。OHSで用いているものは薄く金を蒸着したミラーで、可視光は2割ほど透過するが、赤外線線の反射率は高い。）の反射率は、1.1 μ m付近で90%、1.7 μ m付近で92%で、通常金蒸着ミラーより5%程低い。
- ④一見、均一に蒸着されているように見えるミラーでも、測定場所により大きい反射率ムラがある。

以上の結果は、新しい銀ミラーの最大反射率を98.5%として算出したものであるが、天文台のあるマウナケア山頂は、湿度が低いため半年間での銀の劣化は少なく、1%の反射率低下は、鏡面の汚れやほこり等が原因であると考えられる。また、この測定で、ミラーの反射率は場所により数%変化することが確認された。光に透かして見ると、肉眼でも蒸着の薄い部分があり、蒸着方法にも十分に注意する必要があることが判明した。

今回の測定では、グレーティングの反射率や、反射に伴う偏光度の測定は行っていない。OHSの光透過効率にはそのような要素も含まれているため、正確な効率の予測は困難であるが、各ミラーの反射率を97%、ダイクロイックミラーの反射率を91%、グレーティングの反射率を75%、夜光スペクトルマスクの開口面積率を80%とすると、OHSの光透過効率は、

$$0.91 \times 0.97^8 \times 0.75^2 \times 0.80 = 0.32$$

約 1 / 3 という効率は、多数の反射面を持つ OHS にとっては仕方の無い数値であるといえるが、グレーティングの効率が最も重要な要素であり、高い効率を得るためには良いグレーティングを入手することが必要であると考えられる。

3-2. 性能予測

観測できる限界の明るさ（限界等級）は、観測システム全体の効率・集光力・倍率や、観測波長帯の幅（分光観測の場合は波長分解能）、バックグラウンドの強さ、積分時間、検出器の性能（読みだしノイズや暗電流の大きさ）等によって決定される。ここではまず、これらの要素と限界等級についての関係を述べ、予想される OHS の性能と従来の観測との比較をする。

3-2-1. 限界等級の計算

天体の明るさは、こと座 α 星 (V e g a) を基準に定められている。V e g a は、スペクトル型 A0 (6-2. 参照) の主系列星で、各波長帯での輻射エネルギー密度は表 3-5 のようになっており、これが各波長帯での 0 等の明るさとなっている。天体の見かけの

バンド	中心波長 μm	波長幅 μm	輻射エネルギー密度 $\text{erg/s/cm}^2/\mu\text{m}$
U	0.36	0.068	4.35×10^{-5}
B	0.44	0.098	7.20×10^{-5}
V	0.55	0.089	3.92×10^{-5}
R	0.70	0.22	1.76×10^{-5}
I	0.90	0.24	8.3×10^{-6}
J	1.25	0.38	3.4×10^{-6}
H	1.65	0.30	1.12×10^{-6}
K	2.21	0.48	3.9×10^{-7}
L	3.40	0.70	8.1×10^{-8}

表 3-5
各波長帯での 0 等の
輻射エネルギー密度
(Johnson 1966)

等級（実視等級）は、この明るさを基準として、明るさが 1 / 100 になると 5 等大きくなるという関係で定められるもので、次式により計算される。

$$\text{実視等級} = -2.5 \times \log (\text{天体の明るさ} / \text{0 等の明るさ}) \quad (3-2-1.a)$$

実視等級 m の天体を、波長 λ (μm) ・波長幅 $\Delta\lambda$ (μm) で観測する場合、0等の輻射エネルギー密度を $F_0(\lambda)$ ($\text{erg/s/cm}^2/\mu\text{m}$) とすると、天体の輻射エネルギー F_{obj} (erg/s/cm^2) と光子数密度 P_{obj} (photon/s/cm^2) は、式(3-2-1.a)より

$$\begin{aligned} F_{\text{obj}} &= F_0(\lambda) \times 10^{(-m/2.5)} \times \Delta\lambda \\ P_{\text{obj}} &= F_{\text{obj}} / (hc / (\lambda \times 10^{-4})) \end{aligned} \quad (3-2-1.b)$$

ただし $h = 6.62607554 \times 10^{-27} \text{ erg s}$ (プランク定数)
 $c = 2.99792458 \times 10^{10} \text{ cm/s}$ (光速)

この天体を、主鏡直径 D (cm) の望遠鏡を用い、積分時間 τ (sec) で観測をし、そのときの観測システム全体の効率を ε (装置の透過効率と検出器の量子効率を合わせた量) とすると、集められた天体からの信号量 S_{obj} (electrons) は、

$$S_{\text{obj}} = P_{\text{obj}} \times \pi (D/2)^2 \times \tau \times \varepsilon \quad (3-2-1.c)$$

このとき、ノイズ源となる背景光の光子数密度を1平方秒 ($1'$ (度) = $60'$ (分) = $3600''$ (秒)) あたり P_{sky} ($\text{photon/s/cm}^2/\text{arcsec}^2$) であるとすると、一辺 d (arcsec) の正方形の部分からくる背景からの信号量 S_{sky} (electrons) は、夜光除去率を r とした場合、

$$S_{\text{sky}} = P_{\text{sky}} \times \pi (D/2)^2 \times \tau \times \varepsilon \times d^2 \times r \quad (3-2-1.d)$$

また、装置は温度 T ・放射率 e で熱輻射をすると考えると1平方秒あたりの輻射光子数密度 P_{the} ($\text{photon/s/cm}^2/\text{arcsec}^2$) は、

$$P_{\text{the}} = \int (b(\lambda, \Delta\lambda) \times 10^7 / (hc / (\lambda \times 10^{-4}))) d\lambda \times (\pi / 180 / 3600)^2 \times e$$

積分は $\lambda - \Delta\lambda / 2 \sim \lambda + \Delta\lambda / 2$ (μm) の区間で行なう。
 ただし $b(\lambda, \Delta\lambda) = 11910 / \lambda^5 \times \exp(14387 / (\lambda T) - 1)$
 $\text{W/cm}^2/\mu\text{m/Sr}$ (3-2-1.e)

この熱輻射は、効率 ε' (熱輻射は観測装置内部で発生し、空からの光に比べて通過する光学素子の数が少ないので、 ε' は ε より大きい値である) で信号 S_{the} (electrons) に変わるとすると、

$$S_{\text{the}} = P_{\text{the}} \times \pi (D/2)^2 \times \tau \times \varepsilon' \times d^2 \quad (3-2-1.f)$$

検出器の素子 (pixel) の読み出しノイズを N_{read} (erms) (rms: root mean square)、暗電流を I_{dark} (electrons/s) で、 n 個の pixel で天体からの光を観測しているとする、検出器に到達する光子数は Poisson 分布に従うので、到達する光子数のばらつき、つまり

1回の積分で発生するノイズ N_{tot} (erms) は、蓄積された全電荷量の平方根で与えられる。

$$N_{tot} = \sqrt{(S_{obj} + S_{sky} + S_{the} + n\tau I_{dark} + nN_{read}^2)} \quad (3-2-1.g)$$

天体が観測されたかどうかを判断する基準として、天体からの信号とノイズの比 (S/N) がある。この値をいくつにするかによって、限界等級は大きく変わるので、装置の限界等級を確認する際には、積分時間だけでなく、 S/N 値にも気をつける必要がある。この場合 S_{obj}/N_{tot} の値を定めることによって、(3-2-1.b~g) 式より限界等級が決定される。

3-2-2. OHSの性能

では、実際に具体的な数値を用いてOHSの性能を評価してみる。望遠鏡はハワイ大2.2m望遠鏡、検出器はNICMOS3赤外線カメラを用いた場合、検出器上での最終Fは10と5が選択できるがF/5を用いた場合で考えることにする。その場合の望遠鏡の焦点距離は $220 \times 5 = 1100$ cm、検出器の1pixelの大きさは $40 \mu\text{m}$ であるから、角度に直すと、 $0.004 / 1100 \text{ rad} = 0.75 \text{ arcsec}$ となる。大気のゆらぎによる天体の広がり 1 arcsec 程度と考えられるので、4pixelで一つの天体を観測することになる(すなわち、一辺 $0.75 \times 2 = 1.5 \text{ arcsec}$ の正方形の視野で観測をする)。Hバンドで18等の天体を観測する場合、 $m = 18$, $\lambda = 1.65$, $\Delta\lambda = 0.3$ であるから、(3-2-1.b)より

$$\begin{aligned} F_{obj} &= 2.12 \times 10^{-14} && \text{erg/s/cm}^2 \\ P_{obj} &= 1.76 \times 10^{-2} && \text{photon/s/cm}^2 \end{aligned}$$

望遠鏡の主鏡中央には副鏡の影ができ、更にアルミ鏡面の汚れなどがあるため、望遠鏡の光透過効率はそれほど大きくはなく0.8程度である。またハワイ大の赤外線カメラは、検出器の量子効率とレンズの透過率を合わせた全体の効率が、Hバンドで0.2 (Hodapp et al. 1992) とあまり良くないため、OHSを含めた観測システム全体の効率は、 $\epsilon = 0.051$ となる。主鏡直径は2.2mで200秒積分する場合、 $D = 220$, $\tau = 200$ であるから (3-2-1.c) より、

$$S_{obj} = 6.82 \times 10^3 \quad \text{electrons}$$

背景光となる大気夜光強度は、Hバンドで約 $3 \times 10^4 \text{ photon/s/m}^2/\text{arcsec}^2/\mu\text{m}$ 程度であるから、 $P_{sky} = 0.9$ である。夜光除去率 $r = 1/30$ 、視野一辺 $d = 1.5 \text{ arcsec}$ とした場合、(3-2-1.d) より、

$$S_{sky} = 2.62 \times 10^4 \quad \text{electrons}$$

Hバンドでの熱輻射強度は、273Kで周囲は黒体であるとした場合 $T = 273$, $e = 1$

(実際に空からの光が入ってきている部分は、光の透過率が60%ならば $e = 0.4$ のように、放射率 e は赤外線カメラ直前までの光の損失率とするのが妥当であるが、OHS は入射窓が小さく、赤外線カメラにはほとんど空以外の部分が写ってしまうので、その部分のことを考え $e = 1$ とした) を (3-2-1.e) に代入して $1.5 \sim 1.8 \mu\text{m}$ で数値積分をすると、

$$P_{\text{the}} = 1.69 \times 10^{-3} \quad \text{photon/s/cm}^2/\text{arcsec}^2$$

この熱輻射はOHS装置内に充満しており、赤外線カメラ(77Kに冷却されている)の効率のみが、この熱輻射に影響する。すなわち $\varepsilon' = 0.2$ (赤外線カメラの効率)で、(3-2-1.f)より、

$$S_{\text{the}} = 5.78 \times 10^3 \quad \text{electrons}$$

NICMOS3 赤外線カメラは、読み出しノイズ $N_{\text{read}} = 20 \text{ erms}$ 、暗電流 $I_{\text{dark}} = 1 \text{ electron/s}$ で、 $n = 4 \text{ pixel}$ に対して、

$$\begin{aligned} n \tau I_{\text{dark}} &= 8.00 \times 10^2 \quad \text{electrons} \\ n N_{\text{read}}^2 &= 1.60 \times 10^3 \quad \text{electrons} \end{aligned}$$

これらの値を(3-2-1.g)に代入すると、

$$\begin{aligned} N_{\text{tot}} &= 1.74 \times 10^2 \quad \text{erms} \\ S_{\text{obj}} / N_{\text{tot}} &= 39.3 \end{aligned}$$

S/N の値から考えて、Hバンド測光の場合この1/16程度の明るさ(21 mag)までは観測可能であると考えられる。このときの主なノイズ源は依然skyからの夜光である。しかし、分光の場合には天体からの光と夜光は約1/20に薄められてしまう(波長分散能 $\lambda/\Delta\lambda \sim 100$ なので、1 pixelに入射する光の波長幅はHバンドの場合 $1.65/100 = 0.0165 \mu\text{m}$ であり、これはHバンドの波長幅 $0.3 \mu\text{m}$ の1/18.2にあたる)ので、熱輻射や読み出しノイズ等が主なノイズ源となる。表3-6にOHSによる観測と、従来の観測との比較を示す。従来の観測では夜光除去率 $r = 1$ であるかわりに、効率 $\varepsilon = 0.16$ (望遠鏡と赤外線カメラだけの効率)を用いて同様の計算を行なった。

OHSは分光素子が常温になっているため、分光により天体からの光と夜光は薄められてしまうが、熱輻射成分は測光の場合と同じ値のままである。OHSで分光観測をする場合、この熱輻射をできるだけ抑える必要がある。最も良いのは検出器部分に冷却された分光器を置くことであるが、この装置に対しては赤外線カメラに $1.72 \mu\text{m}$ 以上の長波長を抑えるフィルターを用いることにより(上表は $1.8 \mu\text{m}$ までの波長を考えている)測光観測の場合の1/4に熱輻射を抑えることにした。それにより、全ノイズは約3/4になり S/N は約5となる。従来の観測方法に対し、測光で2.5倍(1 mag)、分光で

		測光		分光	
天体からの信号 (1.8 mag)	S_{obj}	6820	(21400)	375	(1180) 375
背景からの信号	S_{sky}	26200	(2460000)	1440	(135000) 1440
熱輻射 (273 K)	S_{the}	5780	(5780)	5780	(318) 1450
暗電流	$n \tau I_{dark}$	800	(800)	800	(800) 800
読み出しノイズの寄与	$n N_{read}^2$	1600	(1600)	1600	(1600) 1600
全ノイズ	N_{tot}	203	(1580)	100	(373) 75.3
S/N	S_{obj}/N_{tot}	33.6	(13.5)	3.75	(3.17) 4.98

表 3-6 Hバンドで 200 秒積分した場合の S/N 予測
(分光の 3 列目は、 $1.72 \mu m$ より長波長の熱輻射成分を抑える
フィルターを用いた場合)

1. 6 倍 (0.5 mag) がこの OHS に期待される性能であり、夜光の時間変動の寄与が小さくなることを考えると、ここに示した値よりも大きい効果が得られるものと思われる。しかし、ここで重要なことは、分光観測の場合に検出器の素子の性能が非常に大きく影響していることである。赤外線検出素子は、可視光の検出素子 (CCD) に比べて発達が遅れており素子自身の性能はあまり良いものではないが、これまでの観測ではバックグラウンドノイズが非常に大きいためあまり問題とはならなかった。ところが OHS による分光観測の場合、バックグラウンドが非常に小さくなるので、素子の性能が観測の S/N に大きく関係している。将来、検出器の性能が良くなればなるほど OHS の性能は発揮されるのである (6-1 参照)。

第 4 章

4 機械設計と製作

4-1. 光学素子とホルダー

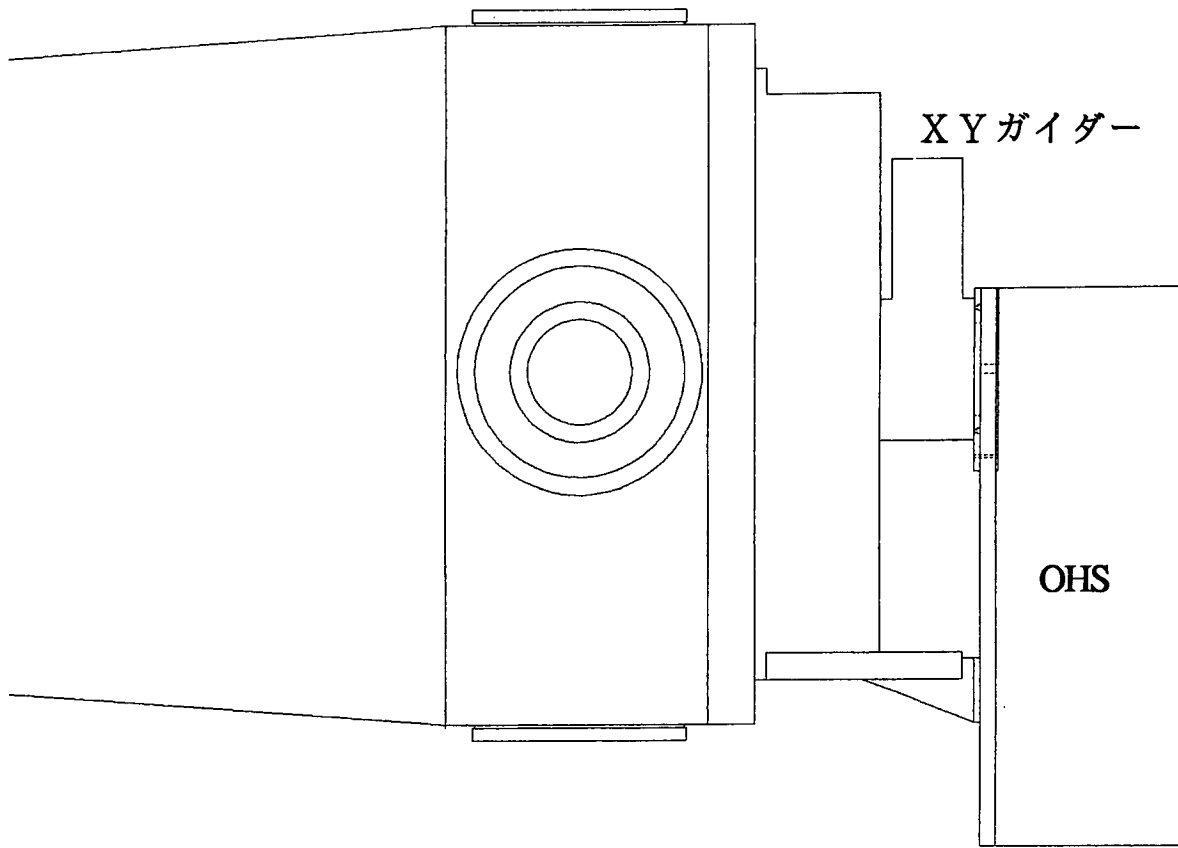
光学設計されたOHSを実際に設計する場合、可動部の決定は非常に重要な問題であり、かつ経験者でなければ予測が非常に困難な問題である。素子の可動性は、その部分が要求されている位置決定精度、観測モードの選択による可動必要性により、次の4つのランクに分類される。

- ①観測中に遠隔操作で移動する必要がある部分。
- ②調整のため比較的大きな移動量を、正確に移動させる必要がある部分。
- ③調整のため微小量の移動が必要となる部分。
- ④一度取り付けた後は特に調整を必要としない部分。

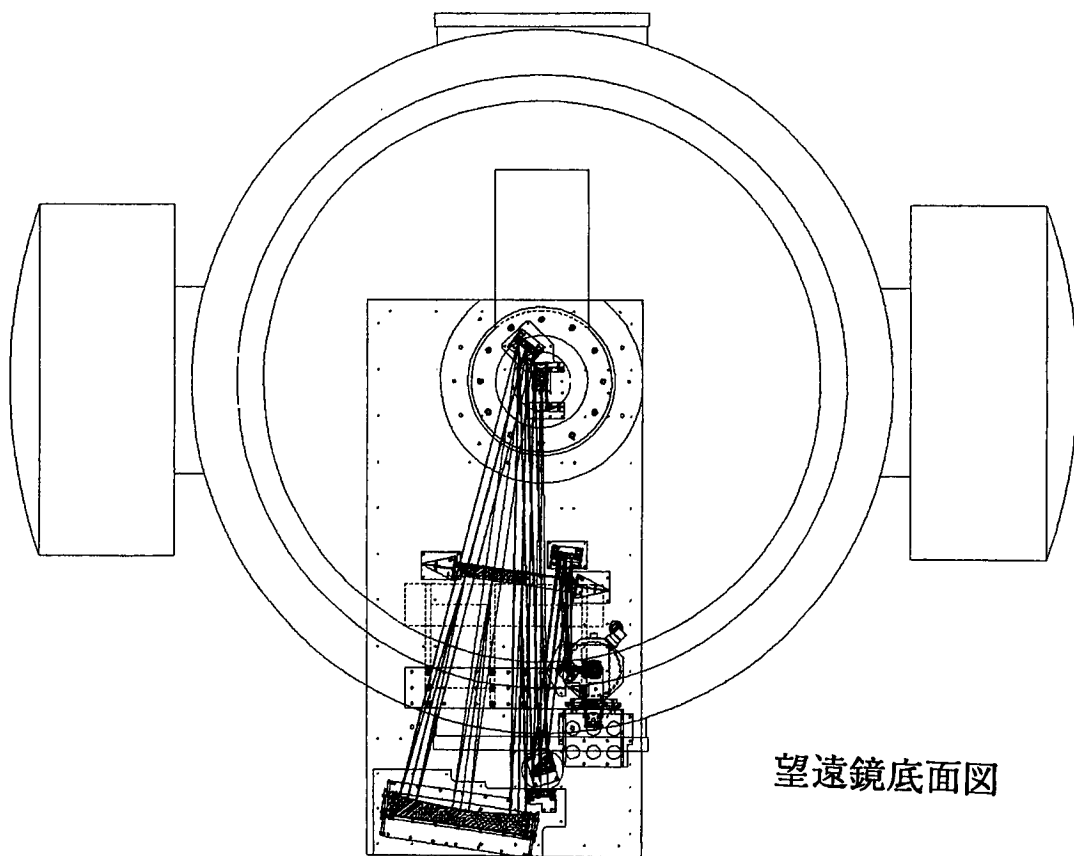
①は、スリット切り替え・プリズム／ミラー交換・赤外線カメラ焦点合わせが相当し、この部分はステッピングモーターによる駆動を行なうこととなった。②は夜光マスクの焦点合わせに関する部分が相当し、市販の手動光学ステージを用いた。③はホルダー設計時に押しネジで調節する機構を設けた。ここでは、一つ一つの光学素子とそのホルダーについて、その形状と役割、固定方法を解説する。可動部に関しては、試験観測の際に可動必要性が判明し、後から増設した部分も数多い（各光学素子の位置は図2-10を参照すること）。尚、スリットステージ・プリズム回転ステージの設計製作と、モーター駆動回路・コントロールソフトの製作は、M2の大屋、塚本、両名によって行なわれた。

4-1-1. OHS取り付け方法

この装置は2m以上の大きさがあり、取り付け場所は焦点が動かない（すなわち装置が移動しない）クーデ焦点を予定していた。しかし、クーデ焦点は天体を追尾するにつれて像が回転するため、その回転を打ち消す装置（イメージローテーター）が必要であり、総反射面数が格段に多くなるため（装置に到達するまでに反射面が10面）断念した。望遠鏡底部のカセグレイン焦点は、装置に到達するまでの反射面が2面と少なく、観測中の像の回転もないため、ほとんどの観測装置はこの焦点を使用しているが、OHSは非常に大きい装置であるため、この焦点に取り付けるには困難が予想された。強度、取り付け手順、調整のしやすさ等の検討の結果、図4-1の様に取り付けることが考えられた。この取り付け方の最大の問題点は、非常に重い（ホルダーを含めて50kg程度）カメラミラーが取り付け部分よりかなり外側に出てしまうことで、この部分のたわみが最終像に及ぼす影響が心配されたが、選定された光学基盤の強度から推定されるたわみの量（1mm）は、夜光マスク上、検出器上での像の大きさにはあまり影響を与えないことが計算により確認され、この方針での詳細設計に踏み切った（しかし、最終的に像の平行移動に関しての問題点が残ることとなった。5-1. 参照）。この場合、天体からの光は光学基盤の裏側から入射することになる。



望遠鏡側面図



望遠鏡底面図

図 4 - 1 OHS の取り付け方法

4-1-2. 光学基盤

OHSは2m以上のサイズがあり、しかも望遠鏡に直接取り付けとなるカセグレイン焦点を使用するため、光学素子を支える基盤はできる限り軽量かつ強固なものでなければならない。OHSの光学基盤は、航空機等にも使用されている横浜ゴム社製のハニカムコアアルミパネル「ハイベックス」を採用した。ハイベックスは2枚のアルミ盤をハニカム構造のコアでつなぎ、軽量でかつ曲げに強い構造をしている(図4-2)。上面はタップ

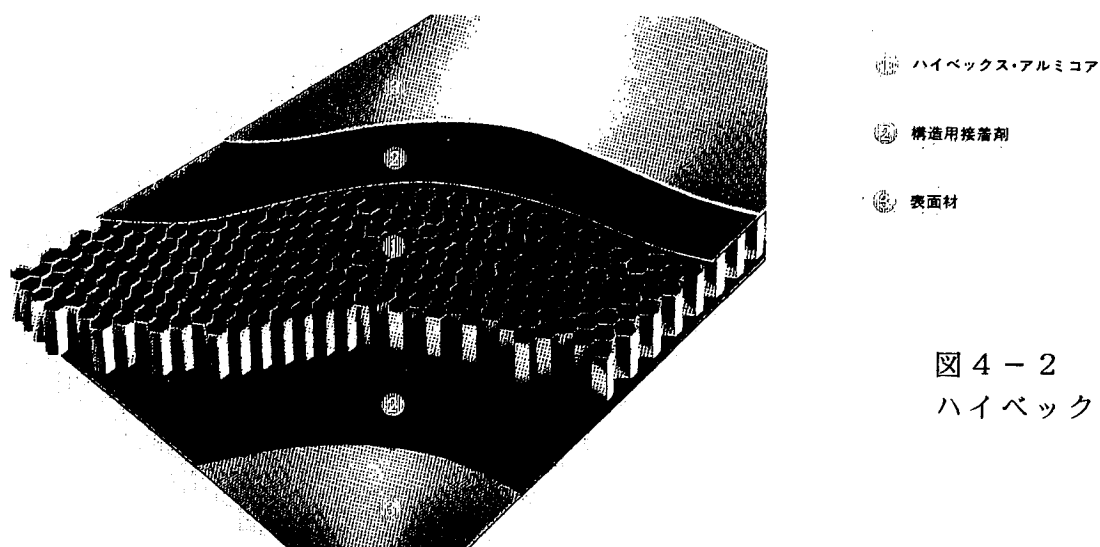


図4-2
ハイベックスパネル

(ネジ穴)を切る必要があるため5mm厚とし、下面は3mm厚とした。その結果、曲げに対する強度は、厚さ44mmのアルミ板に相当し、重量は20%程度で済むものとなった。OHSで用いたハイベックス基盤の寸法と重量は以下の通りである。

寸法 2400mm×1200mm×68mm
重量 78kg

この基盤に光学素子を取り付け、望遠鏡に固定した場合、カメラミラー部分での予想されるたわみは最大1mm程度である。

4-1-3. スリットステージ

OHSは通常の撮像装置とは異なり、分光の後再合成する装置であるから、プリズムを用いない測光観測の場合でも、スリットを用いて観測することが前提となっている。しかし、スリットの無い状態でも観測は可能であって、その場合、本来スリットの置かれる部分のみが夜光除去されており、その両側は夜光除去されない部分(夜光マスクと夜光輝線のパターンがずれた状態になっている)となる。この状態で露出することにより、スリットを当てる最適位置(すなわち夜光が最も除去されている部分)を調べることができ、

また、天体の位置確認や広がった天体を一度に撮る（もちろん中央部しか夜光は除去されないが）ことも可能である。しかし、OHSでの観測はあくまで夜光除去されている部分のみを顧慮して設計したため、これら周辺部の光のケラレ等に関する配慮は一切行っていない。

スリットとしては、 $0.5\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ ($1.5\text{ arcsec} \times 60\text{ arcsec}$) の通常の観測で使用するものと、 $0.3\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ ($0.9\text{ arcsec} \times 60\text{ arcsec}$) の性能調査用（夜光マスク上での像が細いので夜光の漏れが少なく、夜光マスクの最高性能を評価することができる）の2種類を準備し、また、調整用のピンホールとレーザー光導入のための小型ミラーも加えた（小型ミラーは観測中は黒い紙をかぶせ、装置内の光の測定に用いる）。

図4-3にスリットステージの略図を示す。ステッピングモーターとボールネジによる位置決定精度は $10\text{ }\mu\text{ m}$ 程度であり、スリット幅の $500\text{ }\mu\text{ m}$ に対し十分な精度を持つ。スリットの方法は南北に固定されており、方向を変えることはできない（装置全体を回転させる必要がある）。

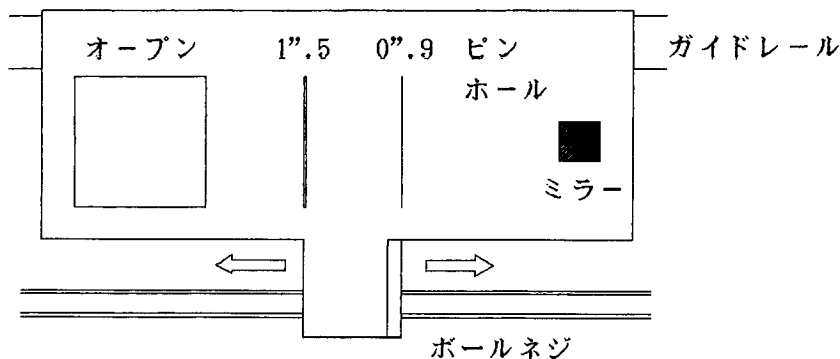


図4-3 スリットステージ略図

4-1-4. ダイクロイックミラー

このミラーは、スリットから入射した光を直角に反射しコリメータへ送る役割を果たすと同時に、可視光の一部を透過させスリットモニタ用CCDカメラへ送るもので、スリットステージをまたぐアーチ形のホルダで支えられている（図4-4）。ミラーの大きさは $50\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 、非常に薄く金が蒸着しており可視光の透過率は波長 $0.5\text{ }\mu\text{ m}$ がピークで20%（図4-5）、反射率は $1\sim 2\text{ }\mu\text{ m}$ で約91%（3-1-2. 参照）である。また、このミラーは望遠鏡の光軸とOHSの光軸を調整する役割も持っており、ミラーを固定しているアルミ板を正面及び背面から4

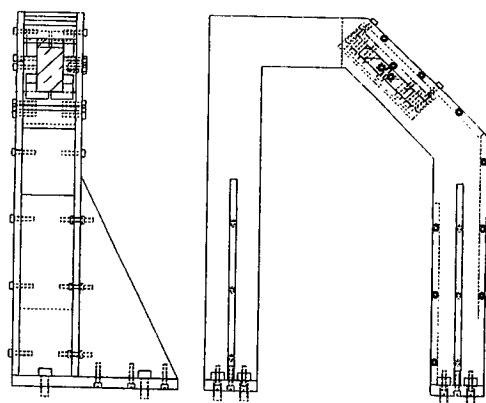


図4-4 ダイクロイックミラーホルダ

本の押しネジで押すことにより、上下・左右の2軸微小回転が可能である。望遠鏡とOHSの光軸合わせは、赤外線カメラでのピンボケ像を見て行なうが、詳細は5-1. で説明する。

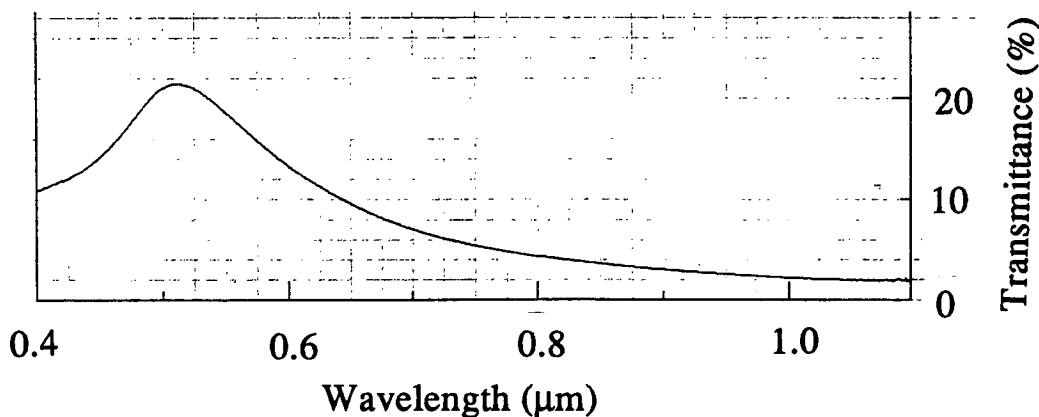


図4-5 ダイクロイックミラー透過率

4-1-5. コリメータ

ダイクロイックミラーから送られてきた光は、ここで平行光にされグレーティングへ送られる。このミラーは曲率半径4000mm、直径220mmの放物面鏡の一部で、120mm×90mmの大きさの銀蒸着鏡である(図4-6)。夜光マスク上での焦点合わせをこのミラーで行なうため(夜光マスクの位置は、波長とマスクの位置関係によって定められており、夜光マスク自体を動かして焦点合わせをすることはできない)、2台のラックピニオンステージにより前後15mmの移動と、左右の微小回転が可能になっている。但し、このミラーを動かすことは光線の平行度を悪くすることにつながり、特にプリズム分光の際の軸上色収差を招くため、原則的には好ましくない。

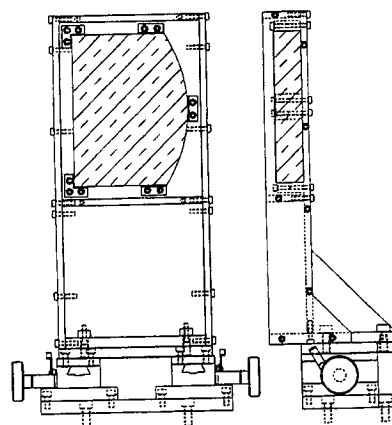


図4-6 コリメータホルダ

4-1-6. グレーティング

OHSは、分散をかけるグレーティングと元の状態に戻す2つのグレーティングを持つが、それらのグレーティングは全く同じ物で、面の向きからブレイズ(溝)の向きに至るまで同じ状態に配置される必要がある(少しでも違う状態であれば、色分散が残り、ピンホールの最終像が細長くなる)。また、この次のカメラミラーは非常に大きく、動かすこ

とができないため、ここで夜光マスクにあたる光の位置を調整する必要もある。そのため、各グレーティングはそれぞれ、左右から4本、背面から4本の押しネジで、一本の太いネジで固定されているアルミ板を押すことにより、3軸全ての微小回転が可能となっている（図4-7）。グレーティングの大きさは80mm×100mm、金蒸着でフッ化マグネシウムによるコーティングが施されており、可視光での回折光効率は最高で65%程度（図4-8）と低い。長い波長では表面の凹凸の影響が少なくなるため、効率はもう少し良くなるものと予想される。一つ目のグレーティング（図4-7上）には副鏡の外縁部から直接入射する夜光（可視光用副鏡の場合は、空からの光が直接入射することは無いが、赤外用副鏡の場合は副鏡周辺部より空からの光が直接入射する）をカットする楕円形の窓（Lyot stop）を取り付けている（光線の断面は円形であるが、グレーティングは光線に対し斜めに用いるため楕円形の窓となる）。

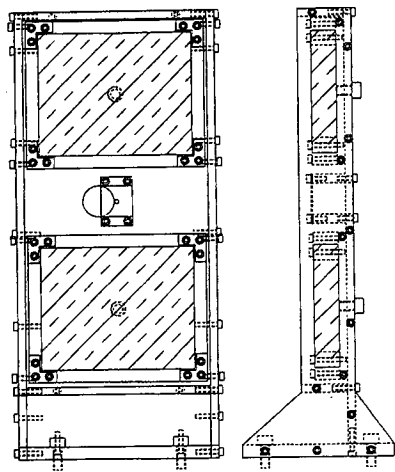


図4-7 グレーティングホルダ

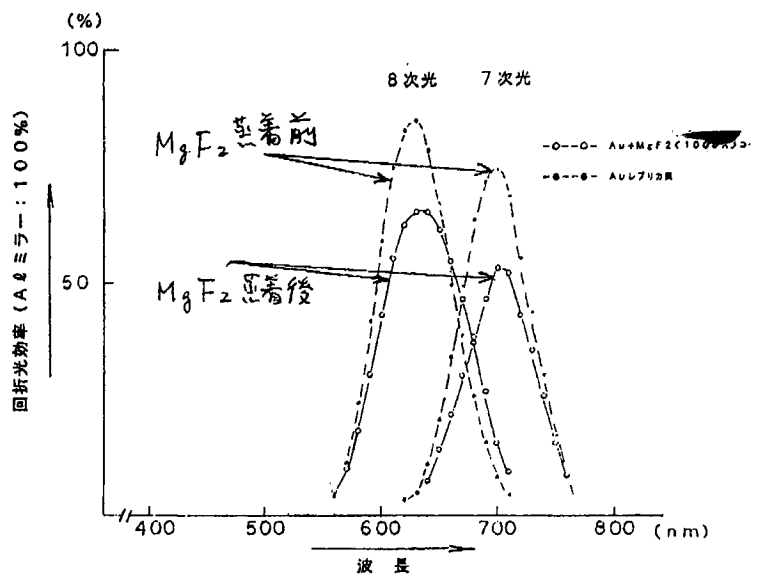


図4-8 可視光での回折光効率

4-1-7 カメラミラー

カメラミラーは、夜光マスク上に集光する役割と、夜光マスクミラーによって反射された光を平行光に戻すという2つの役割を持つ。曲率半径2000mm、直径610mmの金蒸着球面鏡で、上下1/4ずつは不要であるため切り取ってある。自重による変形を防ぐため中心厚は75mmと厚く鏡自体が非常に重いために、ホルダは単なる固定式とし、微調整は他の部分（グレーティング、マスクミラー）で行なっている。このミラーの曲率中心は、2つのグレーティングの中間に調整される必要があるため、グレーティングホルダ

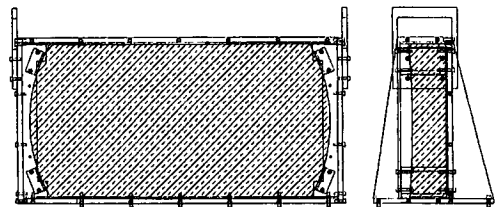


図4-9 カメラミラーホルダ

中央のピンホールを後方から照らし、その像の位置が同じピンホール上に一致するように（試行錯誤で）ホルダを取り付けた。ミラーとホルダを合わせて40kg以上の重さがあるため、望遠鏡の姿勢により基盤のたわみ方が変わり、最終像の位置が徐々に移動する原因となっている（5-1. 参照）。

4-1-8. マスクミラー

マスクミラーはOHSの心臓部とも言える部分で、夜光輝線を除去する夜光マスクを伴っており、カメラミラーの焦点面に置かれている。曲率半径1000mm、直径260mmの凸球面鏡の中央部を幅20mmで切り出した、銀蒸着ミラーである。マスクミラー表面には夜光輝線を除去する夜光マスクがあり、マスクミラー全体をマイクロメータ付きステージで前後に微小に動かすことにより、輝線間隔をマスク間隔に合わせるため（5-1. 参照）、焦点合わせはコリメータを用いて行なう。夜光マスク製作に関する詳細は4-2. で述べる。

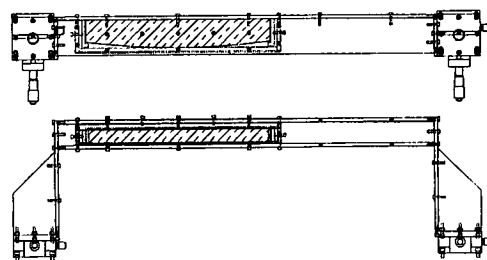


図4-10 マスクミラーホルダ

4-1-9. プリズム

プリズムと平面鏡は同一の回転ステージ上に固定されており、ウォームギアとステッピングモータにより遠隔操作での切り替えが可能である。プリズムは材質BK7、頂角 30° のリトロ（裏面反射）型、反射面は100mm×100mmの銀蒸着面で、このプリズムを用いることにより波長分解能約100の分光観測をすることができる。また、プリズムの背面の平面鏡（銀、100mm×100mm）を用いてスリット測光観測をすることもでき、この回転ステージで検出器上での左右の位置合わせをする。しかし、ウォームギアのバックラッシュ、軸受けの固定精度等の機械精度が非常に大きく反映されてしまう位置であるため、角度の再現性に若干問題がある。

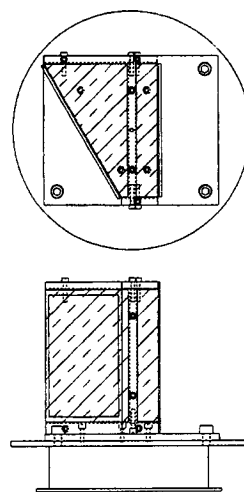


図4-11 プリズム回転台

4-1-10. リフォーカスマirror

再合成された光を再び集光するミラーで、ここで集められた光は2つの平面鏡を通して赤外線カメラへ送られる。曲率半径1300mm、直径240mmの放物面鏡の一部で、120mm×100mmの大きさの銀蒸着鏡である。このミラーは調整の必要があまり無いため、固定式のホルダに入れている。このミラーの蓋には白い紙が張られており、その紙を間接照明することにより、赤外線カメラの素子間の感度特性を調べる(5-1. 参照)。

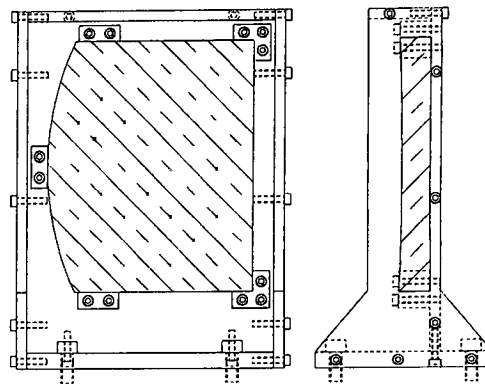


図4-12 リフォーカスマirrorホルダ

4-1-11 平面鏡

リフォーカスマirrorからの光を赤外線カメラに送るために、2つの平面鏡を用いてほぼ直角に2度反射している。この2つの平面鏡は、50mm×60mm、40mm×40mmの大きさの銀蒸着鏡で、それぞれのホルダを押しネジで回転させることにより最終像を回転させることができ、スリットイメージを検出器の素子の並びと平行に調整する役割を持つ。また、赤外線カメラ直前のミラーはダイクロックミラーと同じく4本の押しネジで支えられており、上下左右2軸での回転でOHSと赤外線カメラとの光軸を合わせる(5-1. 参照)。

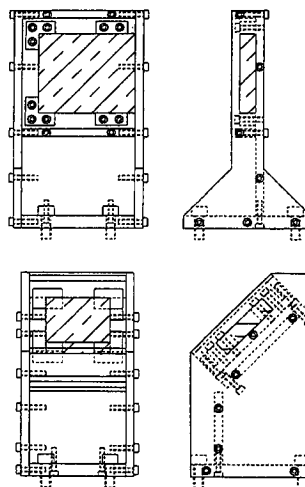


図4-13 平面鏡ホルダ

4-1-12. 赤外線カメラ

赤外線カメラは熱輻射の影響を最小限にするため、真空・低温にされたクライオスタット中に光学系・フィルター・検出器が配置してある。光学系は図4-14に示すように、フィールドレンズ・入射瞳(ここに他の方向からの熱輻射を取り除く cold stop がある)・再結像レンズ(3枚組)・フィルターから成り、焦点面には NICMOS3 赤外線検出器(256 x 256 素子、HgCdTe)が置かれている。NICMOS3 は波長 2.5 μm までの光にしか感度が無いため、フィルターは J (1.1~1.4 μm)、H (1.5~1.8 μm)、K (2.0~2.4 μm)、K' (2.0~2.2 μm) の4バンドの他、数種類の輝線観測用の狭帯域フィルターを通常装備しており、それに OHS 分光観測用の 1.7 μm カットオフフィルターを加え観測に用い

た。赤外線カメラは40kg程度の重量があるが、ハーモニックギア付きステッピングモーターとボールネジにより、10μm程度の精度での位置調整が可能となっている。

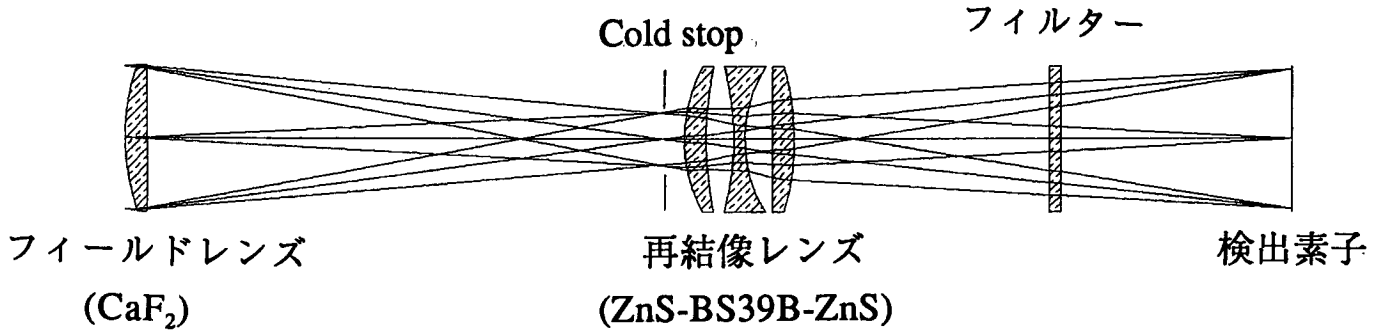


図4-14 NICMOS3 赤外線カメラ光学系

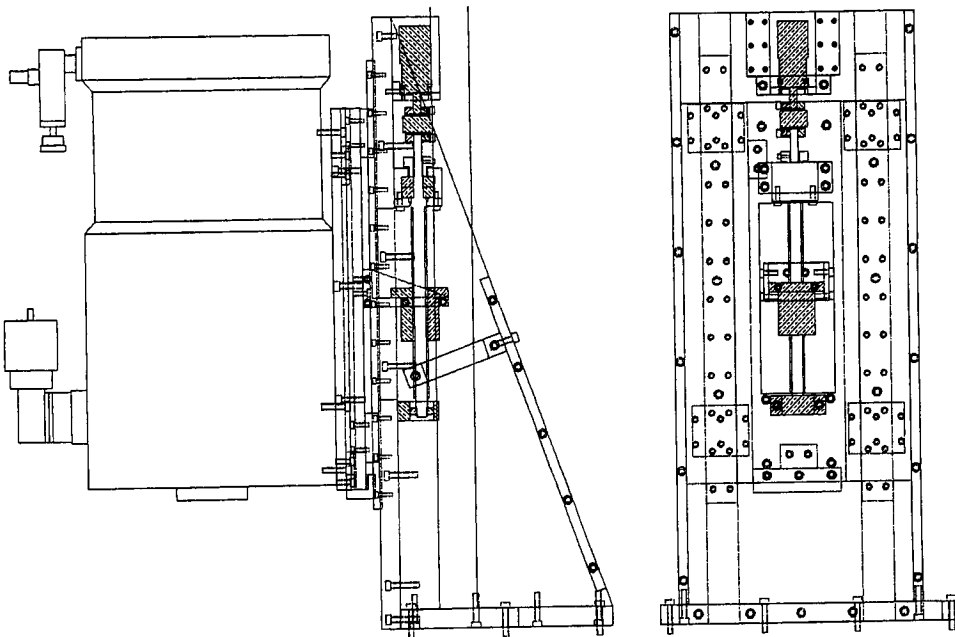


図4-15 赤外線
カメラステージ

4-2. 夜光マスク

夜光マスクを伴うマスクミラーは、OHSの心臓部とも言える部分であり、その製作法については様々な方法が検討され、2つのタイプのマスクミラーが製作された。マスクミラー製作に関して必要な条件は、

- ① マスク位置が正確に製作できること。
- ② 個々のマスク幅が設計値通り製作でき、かつ形状が安定していること。
- ③ マスク位置での反射率がほぼ0（0.1%程度）であること。
- ④ マスク以外の部分での反射率ができるだけ高いこと。

等が挙げられる。光学用ミラーは、研磨されたガラス面に金・銀・アルミ等の金属を蒸着して製作されるが、蒸着面は非常に弱いため、蒸着面に対し物理的な力を加えて夜光マスクをつくることはできない。即ち、蒸着前に鏡面に何らかの方法でたくさんの溝をつくり、

その後蒸着をして、溝内部での乱反射と内部に塗られた黒色塗料による吸収で輝線を取り除く「溝マスク」型と、通常のミラーと同様に蒸着をし、その後、鏡面に黒色塗料でマスクをつくる「吸収マスク」型、2つのタイプのマスクミラーが考えられる。ここでは、それぞれのタイプのマスクミラーについて、製作方法とその特徴を述べる。

4-2-1. 「溝マスク」型マスクミラー

このタイプのマスクミラーは、マスク部分での反射率が非常に低いことが予想され、まず、この方式でのマスクミラーの製作方法が検討された。この方式では、蒸着前の研磨されたガラス面に、物理的または化学的に溝をつくる必要があるが、ガラスを化学的に処理して溝をつくることは困難であるため、円盤状のダイヤモンドカッターにより直接溝を切ることとなった。切削方法は図4-16に示す通り、ミラー本体を精密なXステージに固定し、カッターの位置を変えないようにして、ミラーの位置を移動させながら溝を一つずつ切削していく方法で、株式会社ニコンにより製作された(図4-17)。夜光マスク

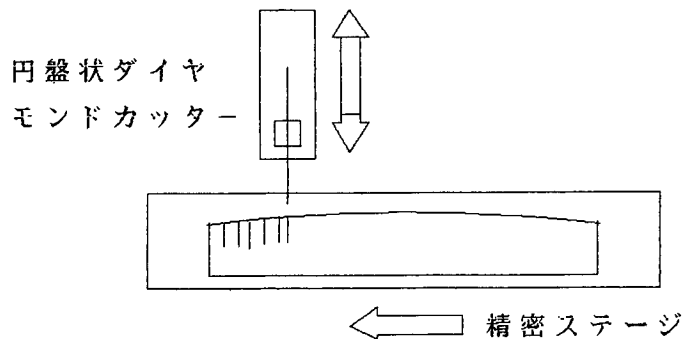


図4-16 夜光マスクの切削方法

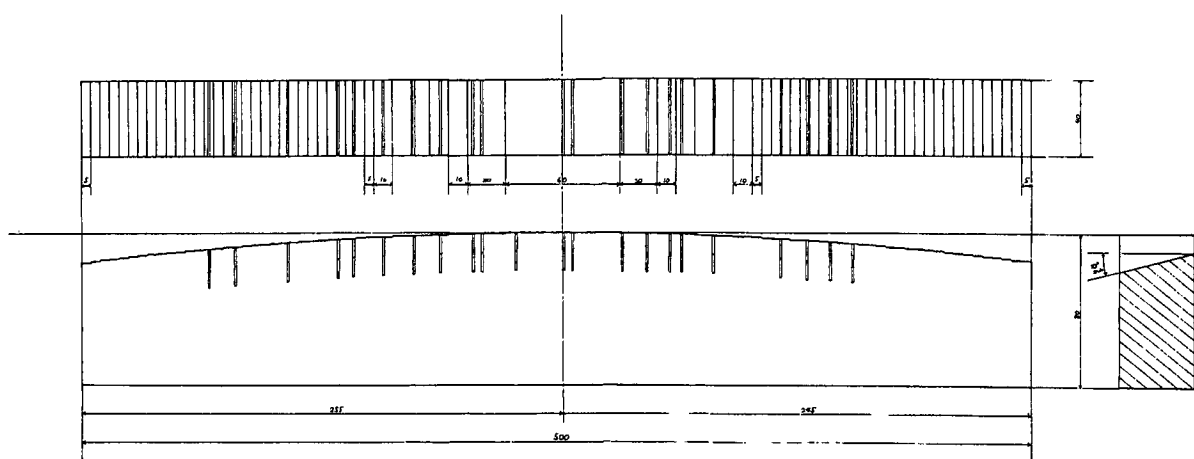


図4-17 マスクミラー

(ダイヤモンドカッターによる切れ込みは一部しか描かれていない)

でのスリット像の大きさは、幅0.25mm、長さ10mmであるため、夜光マスクの最小幅は0.3mm程度が望ましいが、実際に製作された物は最小幅が0.4mm程度とやや幅が広く、また、溝と溝が接近して鏡面の幅が0.3mm以下となる部分は、切削時に発生する溝両側の「バリ」のために反射面としての役割を果たさないため、つながった幅の広い1つのマスクとしたことにより、全体的にマスク部分の面積が大きいものとなった。それに加えて、ダイヤモンドカッターが多くの溝を切っていく内に変形し、位置精度が低下したため、製作後に部分的に溝幅を広げる修正を行なうなど、解決すべき技術課題の多い物となった。蒸着は金で、フッ化マグネシウムでコーティングをし、第一回・第二回の試験観測に用いた。第二回目の試験観測では、溝両側の「バリ」による乱反射を防ぐため、切削端面を、ダイヤモンド粉末を剃刀の刃に電着した特殊やすりで面取りして用いた（図4-18）。

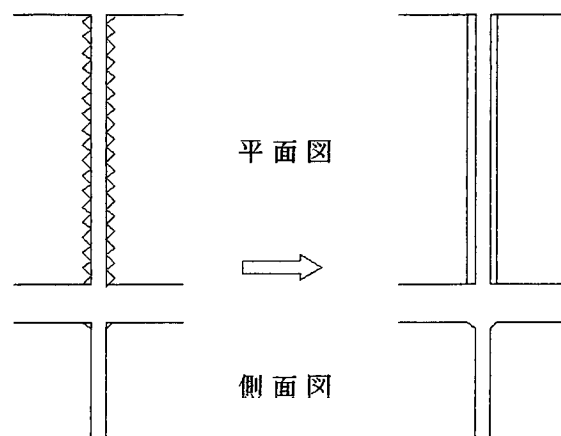


図4-18 溝マスク切削時の「バリ」の処理

4-2-2. 「吸収マスク」型マスクミラー

上記のように「溝マスク」型のマスクミラーは製造が非常に難しく、かつ切削時に必ず発生する溝両端の「バリ」を処理しなければならない等、安定したマスクを製作することが困難であるため、溝内部での乱反射・吸収という考えを改め、単に黒色塗料だけでマスクをつくることを考えた。その場合最大の問題となるのが、黒色塗料の反射率である。近赤外域での黒色塗料の反射率は、塗料の材質や塗り方により異なるが、優秀なものでは0.1%以下の反射率であると言われている。それを確認するため、5種類の黒色塗料でそれぞれ一度塗り・二度塗り・三度塗り、計15個のテストピースを準備し、ミラーの反射率測定時（3-1. 参照）に反射率を測定した。結果は、以下の通り。

①住友スリーエム velvet

特徴：黒ペンキ風塗料。こすると黒い粉が落ちる。塗りにくいが取れにくい。

②アサヒペン スエード調塗料

特徴：アクリル樹脂スプレー。

③アサヒペン 耐熱塗料

特徴：シリコン樹脂スプレー。

④アサヒペン アクリルラッカースプレー

特徴：アクリル樹脂・ニトロセルロースの入ったスプレー。

⑤ファインケミカル ブラッセン


特徴：グラファイトを主成分とするスプレー。

塗料	一度塗り	二度塗り	三度塗り
① velvet	0. 1 0	0. 0 4	0. 0 4
②スエード調塗料	0. 0 5	0. 0 5	0. 0 4
③耐熱塗料	0. 1 2	0. 1 2	0. 1 2
④ラッカースプレー	0. 2 5	0. 2 0	0. 1 6
⑤ブラッセン	0. 6 0	0. 5 0	0. 4 0

表4-1 1. 1~1. 7 μmでの黒色塗料反射率 (%)

この測定の結果、velvet とスエード調塗料は非常に反射率が低く、黒色塗料だけでも十分夜光マスクとしての役割を果たす事が判明した。また、velvet は耐久性は良いが扱いにくく粉が落ちて鏡面を汚し易いので、スエード調塗料を用いることにした。

次に、この塗料を用いてどのように鏡面に夜光マスクをつくるかが問題となるが、鏡面に直接塗装を行なうと、マスク以外の部分が汚れてしまう危険性があるので、非常に薄い金属板をエッチングで加工してマスクをつくり、それを塗装した後、鏡面に張りつける方法を採用した。この方法での夜光マスク製作は、大日本スクリーン製造株式会社に依頼しマスク相対位置精度、マスク幅精度ともに±10 μm程度の十分な精度で製作された。黒色塗料による塗装の後、マスク端面に付着した塗料を剃刀の刃で削り落として仕上げ、銀蒸着の凸球面ミラー表面に固定してマスクミラーを製作した。第三回試験観測以降はこのタイプのマスクミラーを用いており、非常に良い製作方法であることが確認されている。

現在の夜光マスクは、様々な方面から総合評価された夜光輝線波長(3-1. 参照)  に対して、マスクミラー上での位置を光路追跡プログラムにより計算し、スリット幅と収差による像の広がり、製作精度等を顧慮し最小マスク幅0. 35 mmで設計したものである。次項に1994年3月現在で用いている夜光マスクの設計値を示す。

位置 (mm)	幅 (mm)	位置 (mm)	幅 (mm)	位置 (mm)	幅 (mm)	位置 (mm)	幅 (mm)
-116.354	0.350	-55.121	0.724	-2.018	0.559	54.892	0.350
-114.892	0.350	-54.079	0.350	-0.042	0.350	56.037	0.350
-112.776	0.554	-53.121	0.576	2.550	0.350	57.690	0.583
-111.848	0.720	-51.845	0.350	4.109	0.350	59.291	0.350
-110.343	0.627	-50.190	0.350	4.922	0.350	60.983	0.350
108.472	0.741	-48.001	0.350	6.721	0.350	61.721	0.350
-106.346	0.350	-46.546	0.350	8.714	0.350	63.840	0.350
102.722	0.350	-42.212	1.375	11.348	0.350	65.551	0.350
-98.619	0.350	-41.145	0.350	13.474	0.350	66.457	0.350
-97.692	0.350	-39.783	0.350	15.158	0.585	67.847	0.350
-96.504	0.350	-39.154	0.350	16.127	0.350	69.537	0.350
-95.056	0.350	-37.398	0.612	16.630	0.350	70.358	0.553
-91.654	0.350	-36.637	0.350	18.553	0.350	72.396	0.593
-87.557	0.350	-33.877	0.766	21.081	0.350	73.945	0.350
-86.845	0.350	-29.818	0.350	22.860	0.350	75.898	0.350
-84.800	0.350	-27.242	0.711	27.346	0.350	77.698	0.600
-84.026	0.350	-25.657	0.350	32.513	0.350	82.348	0.746
-81.933	0.767	-24.587	0.350	34.088	2.120	84.520	0.350
-80.780	0.350	-23.639	0.350	35.847	0.350	85.606	0.350
-78.405	1.042	-21.359	0.350	36.726	0.350	91.733	0.350
-77.435	0.350	-19.257	0.350	37.686	0.350	94.816	0.724
-75.675	1.187	-17.839	0.350	40.030	0.679	96.584	0.350
-73.406	0.350	-15.903	0.623	41.357	1.623	97.750	0.350
-71.376	0.533	-14.853	0.350	43.399	0.350	98.848	0.350
-69.407	0.350	-12.815	0.504	43.982	0.350	101.936	0.560
-68.676	0.373	-12.134	0.350	45.367	0.350	104.636	0.350
-66.777	0.505	-11.407	0.350	46.082	0.350	105.562	0.350
-63.730	0.350	-9.396	0.817	46.771	0.540	108.498	0.350
-63.174	0.350	-7.067	0.350	48.603	0.350	114.410	0.350
-62.075	0.350	-5.479	0.350	49.716	0.350	115.622	0.350
-58.685	0.350	-4.652	0.791	50.725	0.581	119.101	0.350
-56.989	0.350	-2.732	0.350	53.182	0.350	124.213	0.350

表 4-2 夜光マスク位置

マスク位置は夜光マスク (図 4-19) 中央を原点としている。

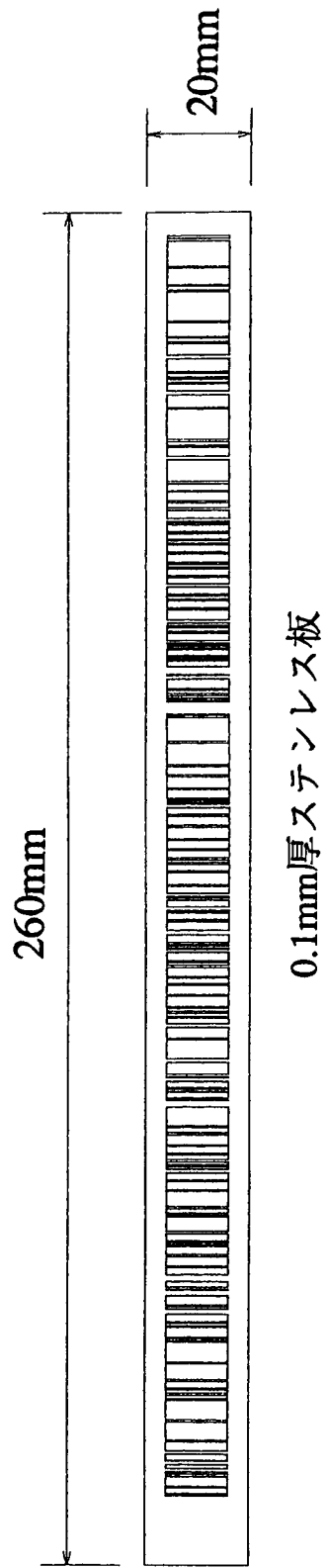


図 4 - 1 9 夜光マスク

第 5 章

5 観測

5-1. 試験観測と性能評価

OHSの試験観測は1992年11月、93年3月と、93年10月の観測の一部の計3回行なわれ、性能評価をすると同時に調整方法・解析方法が確立され、3回の観測を通して様々な部分が改良された。これまでの3回の観測は、全体的にあまり天候には恵まれなかったが、新しい装置の調整、性能検査を行なうことはできた。

観測日	晴天率	内容
1992.11.17-23	1/7	組立・基本調整・性能評価・装置の変形検査
1993. 3.11-17	2/7	光軸調整方法・月の影響・性能評価・クエーサーなど観測
1993.10.13-22	3.5/10	光軸調整方法・新夜光マスク・熱輻射抑制・性能評価 精密な天体導入方法・スターバースト銀河など観測

表5-1 これまでの観測の概要

ここでは、これら試験観測の結果をまとめ、現在のOHSの状態と問題点について以下の順で解説し、考察を行なう。

- ①観測および解析方法の概略
- ②システム効率
- ③夜光除去率
- ④調整手順
- ⑤結像精度
- ⑥月の影響
- ⑦透過特性と感度補正
- ⑧装置変形
- ⑨ノイズ源

(これらの結果の詳細に関しては、観測結果報告として Appendix C~E に記述している。)

5-1-1. 観測および解析方法の概略

天体を観測する場合、望遠鏡を天体の方向に向け、観測装置を通して検出素子の中に光を集め、最終的に電気的情報として素子から取り出されるのであるが、この中には実に様々な情報が含まれている。天体からの信号はもちろんのこと、大気の子光、装置の熱輻射、検出素子の暗電流・読みだしノイズ等が含まれており、それらは、天体から、空または望遠鏡から、OHS内部から、赤外線カメラ内部または素子からの、4つの情報に大別される(表5-2)。これらの情報は、望遠鏡の方向を少し変えて(すなわち天体の写って

る場所を少し変えて) 観測する、OHSのスリットを閉じる、赤外線カメラ内部のフィルターホイールを閉じることにより区別することができ(図5-1)、異なる種類の情報の差を計算すれば、必要な部分からの光のみを取り出すことができる。

天体	天体からの光	
空 望遠鏡	大気光	大気上層の分子・原子の発する光。
	黄道光	惑星公転面近くに存在している塵が太陽光を散乱した光。
	星野光	星や星雲などの集積光。
	散乱光	地上からの光が大気中の塵によって散乱された光。
	熱輻射	望遠鏡と大気からの放射で、放射率は普通0.3程度(黒体=1)
	迷光	装置周辺の可視光の散乱光。基本的には存在していない。
OHS	熱輻射	OHS自体からの放射。放射率は0.7程度と予想される。
検出器	暗電流	光が入射していないときも素子に流れている電流。
	回路光	読みだし時に素子周辺の回路に電流が流れ、発生する熱。
	読みだしノイズ	読みだし回路から発生するノイズ
	バイアス	各素子に予めかけられている電圧。各素子の0点。

表5-2 検出器からの情報

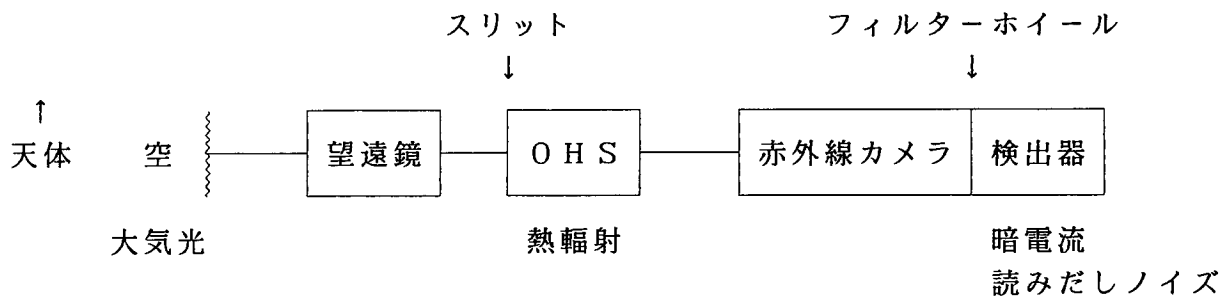


図5-1 情報の識別

天体の移動・スリット開閉・フィルターホイール開閉により、情報を識別する。

また、天体からの信号を正しく情報として取り出すためには、検出素子の感度特性と、観測装置の光学特性を補正する必要がある。現在のOHSは、望遠鏡の姿勢変化などによる装置変形により、検出器に到達する光の位置が変化するために、赤外線カメラ部分の感度補正と、望遠鏡とOHSを合わせた部分の感度補正を独立に行なう必要がある。すなわち、望遠鏡とOHSの位置関係はほとんど変化しないので一体の観測装置と考え、OHSと赤外線カメラの位置関係は変化量が大きい(OHSの像面位置と赤外線カメラ位置

の両方が変化する)、別々の観測装置とみなす必要が生じるのである。現在、赤外線カメラの感度補正は、OHS内部に暗い光源を設けることにより行なっており、そのほかの部分の感度補正は、夜光除去されていない部分の空を用いて行なっている。更に、分光観測の際の波長方向の感度補正は、スペクトル型の判明している近傍の主系列星のスペクトルを用いて行なっているが、星自身の持つ吸収線の寄与が補正されていないため、これに関してはやや問題がある。吸収の寄与を補正するためには、黒体の比較光源と地球大気の吸収特性が必要で、現在、導入を検討中である。

その他、解析時に必要なことは bad pixel (不良素子) の補正である。bad pixel には、光が当たっていない状態でも異常に高い値を出す hot pixel、光が当たっていても反応しない cold pixel の他、入射光子数と出力される値が比例関係から著しく外れているものや、素子内部での接触不良によりランダムに発生する bad pixel があり、その数は2%以上と非常に多い。しかし、これらの bad pixel の大部分は発生場所が決まっており、それらの場所を登録し、その部分を周囲の値の平均値で内挿することによって大体の補正をすることは可能である。ランダムなものに関しては、その都度、手作業で補正するしかないが、非常に判別しにくい低いレベルの異常の補正は困難である。

以上、解析の際の主な手順は、①比較 frame (画像) との差引、②感度補正、③ bad pixel 補正の3つであるが、どの成分をいつ補正するかが複雑で、分光観測の場合には、実に100以上もの手順で解析が行なわれている (Appendix E 参照)。解析手順の具体的内容については5-2. で述べる。

5-1-2. システム効率

星からの光は、観測装置を通して検出器上に集められ、検出素子内部の電子を励起する。励起された電子は半導体内部を電解に沿って移動し、一定時間電極に蓄積された後、コンデンサー両端の電位差として ADU というデジタル量で読み出される。ハワイ大の赤外線カメラに用いている NICMOS3 検出器の場合、1 ADU は 23 electrons に相当するのでこの関係により、検出素子にたまった電子数を知ることができる。素子には最大 5×10^5 個の電子をためることができるが、あまり多くの電子をためると素子の線形性 (入射光と出力の比例関係) が保存されなくなるので、多くてもこの半分程度の電子数で読み出すようにすることが必要である。

観測装置全体の効率は、明るさが非常に詳しく測られている標準星を観測することによって調べられる。OHSの場合、標準星にはHバンド等級で9~12等の星を用い、30秒程度積分をする事によって、適度な信号量が得られ、(3-2-1.a~c) 式を用いることにより、読み出された信号量と標準星の明るさから、システム全体の効率 ϵ が計算できる。 ϵ は、検出器上での星の位置・天候等によって異なるが、検出器上でのやや感度の良い部分を中心に測定したところ、Hバンドで最大5.4%、Jバンドで最大2.5%の値が得られた (図5-2)。波長帯による効率の違いは、検出素子の波長特性とバンドパスフィルターによるものと考えられ、Hodappら (Hodapp et al. 1992) が測定した赤外線カメラの効率 (Hバンド20%、Jバンド11%、但しフィルターは現在使用中のものとは少し異なる) の比率とほぼ一致している。

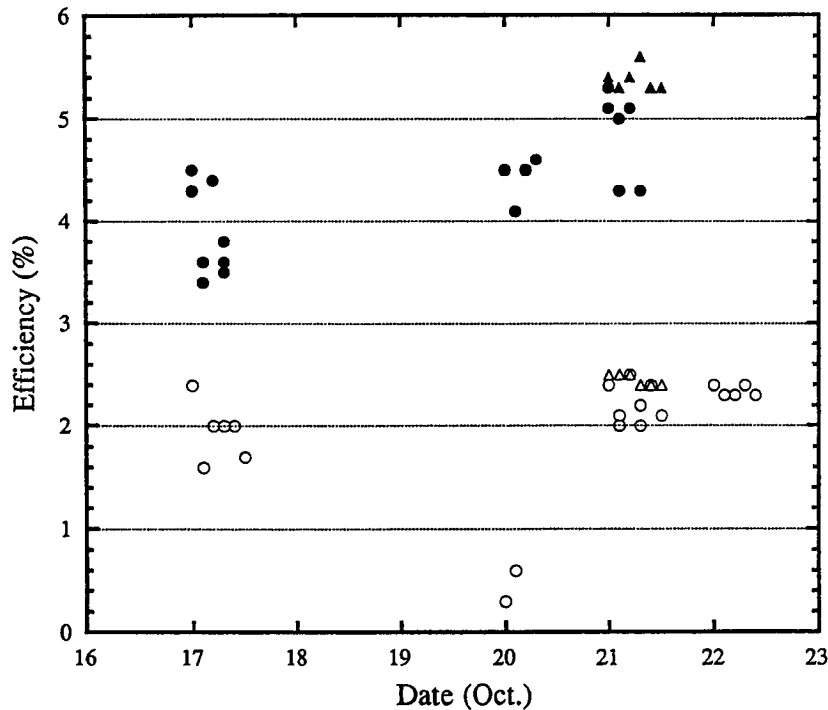


図5-2 システム全体での効率

第三回観測での標準星観測によって得られたシステム全体の効率。

黒はHバンド、白はJバンドのデータで、三角は明るい星を3秒の短い積分時間で観測したもの、その他はやや暗い星を30秒の積分時間で観測したものである。観測日による効率の変化は、天候の違いによるものである。

このうち望遠鏡の効率は、主鏡・副鏡のアルミ反射面の反射率を94%（鏡面の汚れ、劣化などにより最良の状態より2~3%低く見積っている）、2.2mの主鏡中心には70cm程度の穴があいているため、開口率を考えて

$$0.94^2 \times (1 - (0.7 / 2.2)^2) = 0.794$$

すなわち約80%であり、赤外線カメラのHバンドでの効率20%と合わせると、OHSのみでの光透過効率は、

$$0.054 / 0.8 / 0.2 = 0.338$$

より、34%と求められる。これは、3-2. で推定された値0.32とよく一致し、推定はほぼ正しいものであったと考えることができる。

OHSの光透過率は、同一の光源でOHS入射スリットと赤外線カメラ入射窓を交互に照らすことにより直接測定できるようにも思われるが、この方法は光の当て方が難しく、あまり精度良く測定する事はできない。なぜなら、OHSの入射光はF/31であるのに対し、赤外線カメラの入射光はF/10で、更に、光束中心部はカメラ内部の cold stop で遮蔽されているために、同一のF比をもつ光源では正しい比較ができないからである。第二回観測では、試験的に同一の光源でOHSの光透過率を直接測定することを試みたが、

結果は20%であった。この数値では、現在得られている5%以上のシステム全体の効率を説明することができない。OHSの光透過率を直接測定するには、実験室で測定するよりも、望遠鏡に直接赤外線カメラを取り付けて標準星を観測し、その場合の観測システム全体の効率と比較する方が確実であるが、現在の所、そのようなデータは入手できていない。

現在の所、システム全体の効率を上げるために、次の点に注意すべきであることが判っている。

- ①望遠鏡・OHS・赤外線カメラ間の光軸を正確に合わせること。
- ②鏡面にはできる限り新しい銀蒸着面を用い、また、夜光マスクの開口面積が小さくなり過ぎないようにすること（できるだけ無駄の少ないマスクをつくること）。
- ③グレーティングを効率の高いものにする。

第一回目の観測では、①の条件が良く満たされていなかったため、システム全体の効率は1.8%と非常に低く（半分以上の光をロスしていたようである）、第二回目の観測では①はほぼ満たされたが②の点についてやや問題が残り、システム全体の効率は4.4%であった。第三回目の観測で、ようやく①②の点に関する問題が完全に解決され、効率は4%となったが、③の点に関しては解決のめどが立っておらず、今後、次期OHSを製作する上で重要な問題となっている。

5-1-3. 夜光除去率

OHSは測光・分光2つの観測モードを持つが、夜光除去率は測光モードで測定される。プリズムを用いない測光観測モードは、選択するスリットにより異なった目的で用いられている（表5-3）。通常のOHSの観測では、まずオープンスリット撮像の観測が行な

観測モード	名称	スリット	目的
測光観測モード	オープンスリット撮像	60"x60"	調整、天体搜索、明るい天体の測光 暗い天体の測光、分光場所決定 限界除去率の測定
	標準スリット測光	1".5x60"	
	狭スリット測光	0".9x60"	
分光観測モード	標準スリット分光	1".5x60"	通常の分光 高波長分解能での分光
	狭スリット分光	0".9x60"	

表5-3 OHS観測モード

われる。この場合、空は夜光マスクと夜光輝線の位相がそろって中央部でしか除去されず、両側は夜光がほとんど除去されていない部分となる（図5-3）。夜光が除去されている中央部の黒い縞を「ダークレーン」と呼んでいるが、その両側の部分も、たまたま強い夜光輝線がマスクによって一部除かれている部分があり、薄く縞模様になっている。OHSでの天体の観測は、この状態で、目標の天体をダークレーンの中央部に移動し、次に同じ

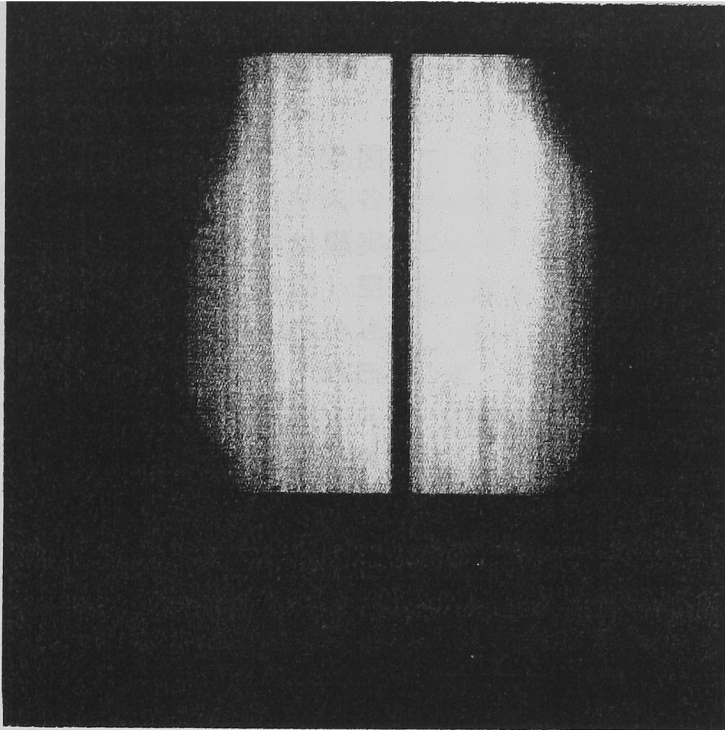


図5-3

オープンスリットで見た空

OHSと赤外線カメラ間での光の受渡しが完全でないため、視野周辺部では赤外線カメラによるケラレが生じている。左右両端部は観測上重要でない部分のため設計の際に顧慮されておらず、OHSの透過効率は下がっている。

場所に正確にスリットを重ね、最後にプリズムを用いて分光観測をするという手順が進められるが、実はこのオープンスリット撮像ではOHSの能力はあまり発揮されない。なぜなら、ダークレーン両側の部分が非常に明るいため、その部分の光の少しの散乱で中央のダークレーン部分が明るくなってしまふからである。このダークレーン部分に正確にスリットを当てることにより、明るい散乱光はなくなりOHSの性能が発揮されるのだが、この場合スリットが狭いほど、夜光マスクの位置不定性による夜光輝線の漏れが少なくなり夜光除去率は高くなる。夜光除去率は、このオープンスリット撮像での、最も明るい部分（この部分では偶然に除去された夜光輝線はほとんど無いものと考えている）に対する明るさの比によって求められる（空の明るさは時間により刻々と変化するので、時間的に近接したデータで比較することが重要である）。図5-4にオープンスリット・標準スリット・狭スリットによる観測結果を一次元化したグラフを示す。それぞれのスリットに対する夜光除去率は以下の通りとなっている。

名 称	スリット	夜光除去率
オープンスリット撮像	60"x60"	1 / 6
標準スリット測光	1" 5x60"	1 / 18
狭スリット測光	0" 9x60"	1 / 21

表5-4 各スリットでのHバンドでの夜光除去率

狭スリット測光の場合の1 / 21という値は、現在使用している夜光マスクでの限界の値を示していると考えて良いが、これは夜光輝線間の連続スペクトル成分の強度測定結果などから推定された目標値1 / 30 ~ 1 / 50 (3-1 参照) に比べて、まだ十分な値

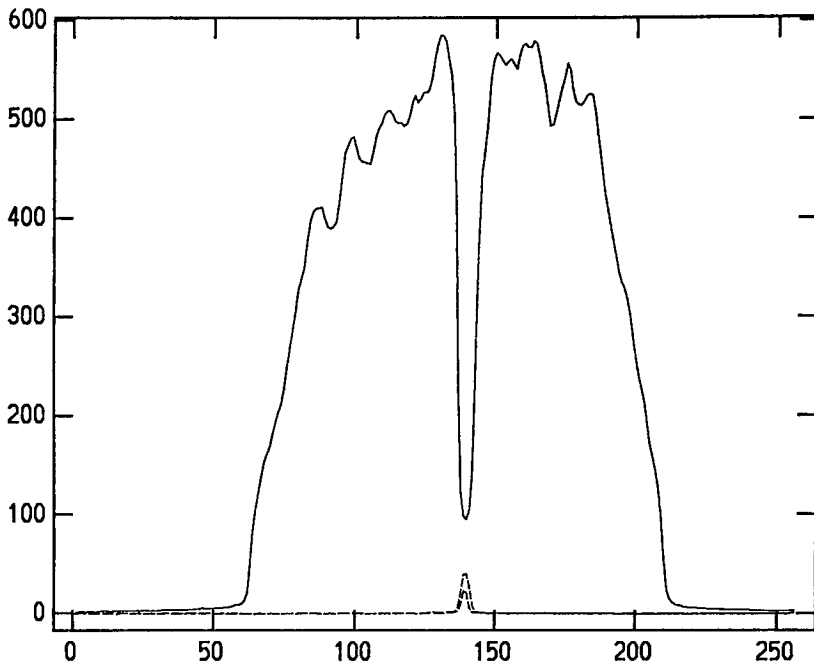


図5-4
各スリットでの空の明るさ
実線はオープンスリットで見た空(図5-3)を一次元化したもので、下の2本の破線はそれぞれ、標準スリット・狭スリットを用いた場合の結果である。スリットを用いた場合、三角状に中央部が高くなるが、この部分の面積を対応するスリット幅で平均化して明るさを調べる。横軸は検出素子の列番号、縦軸はカウントである。

とは言えない。これは、夜光マスクのデータが不完全であることによるもので、一部の夜光輝線が除去されずに残っているためである。図5-5にダークレーン上とそのすぐ横の夜光が除去されていない部分について、分光観測を行なった結果を示す。全体的にまだかなりの夜光輝線が残っており、特にJバンドは相当の部分が残ってしまっている事がわかる。これらの残っている夜光輝線は、この観測結果だけからではどの波長のものであるかは正確には判らないが、過去に我々がハワイ大望遠鏡クーデ分光器で観測した結果と、他のグループによる観測結果などを総合的に判断した夜光輝線モデル(3-1. 参照)を用

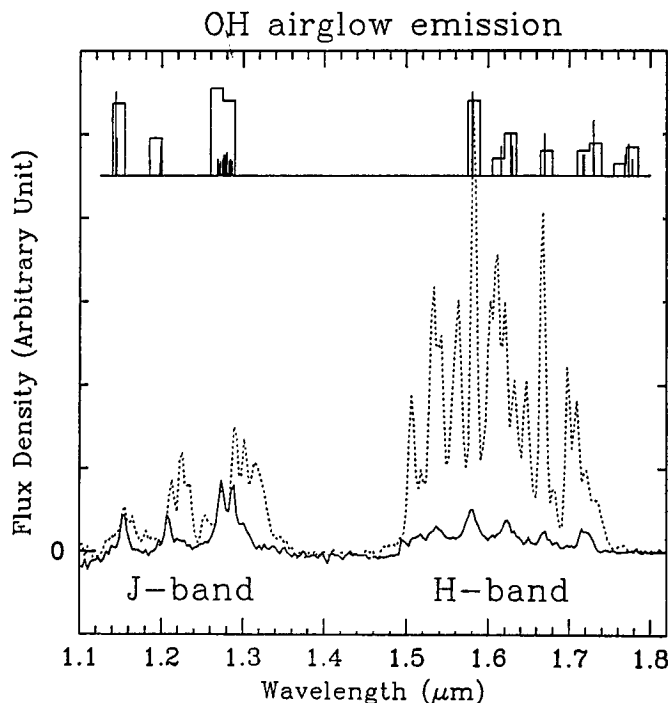


図5-5 夜光スペクトル
実線はダークレーンにスリットをあてて分光した結果で、破線はその横の夜光除去されていない部分での分光結果である。除去されずに残っている輝線が幾つかある事が判る。上段は各種データを合成してつくられた夜光輝線モデルによる夜光マスクシミュレーション結果で、観測結果とよく一致していることが判る(酸素の輝線は幅広くつながっているため、たくさんの細かい輝線で表している)。

いて、現在使用している夜光マスクの性能シミュレーションを行なった結果と比較することにより、予想することはできる。図5-5には夜光マスクシミュレーションの結果も併せて示してあるが、過去の夜光輝線観測データをうまく合成すると観測の結果を良く表すことができ、現在残っている輝線の半分以上は酸素分子の輝線（ $1.27\sim 1.28\mu\text{m}$ 、 $1.58\mu\text{m}$ ）であり、その他は弱いOHの輝線であることがこの結果から予想された。現在、これらの残っている夜光輝線を完全に除く、新しい夜光マスク（4-2. 参照）の製作が終了し次回観測に備えている。この様に夜光マスク設計は、完全な夜光輝線データが存在しないため、試行錯誤で設計を進めている状態にある。

5-1-4. 調整手順

OH Sを用いた観測は、従来までの望遠鏡に直接カメラを取り付ける観測とは違い、望遠鏡・OH S・赤外線カメラの3つの装置の光軸と、結像面の位置を調整しなければならず、更に、OH S自体が内部に結像面（夜光マスク上）を持つため、調整は非常に手間の

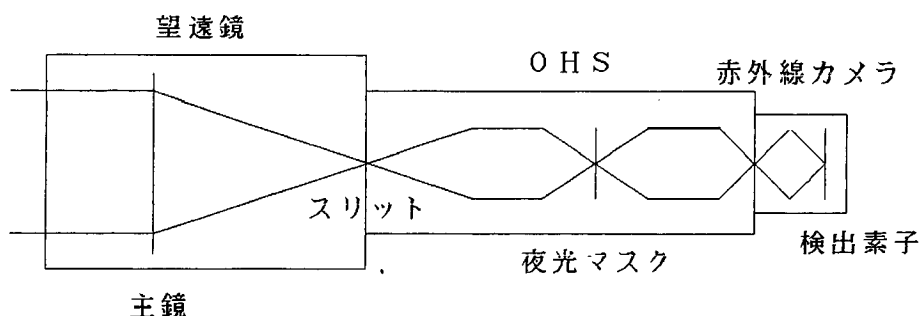
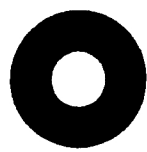
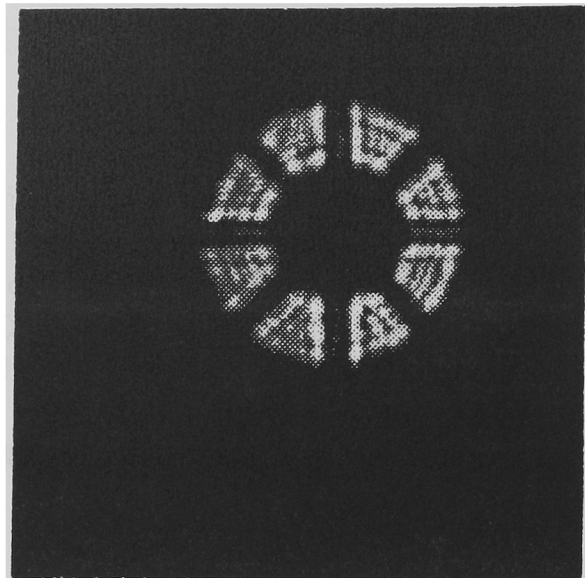


図5-6 観測システム全体での結像点位置概念図

かかるものとなる。調整は始めに、OH S入射スリット付近にレーザーを取り付け、各光学素子上の定められた点で反射されるように各光学素子の向きを微調整する。次に、OH Sのスリットをピンホールにし、ドームライトを使って赤外線カメラの焦点合わせをする。この状態で、OH Sと赤外線カメラの焦点は合っている（夜光マスク上では焦点は必ずしも合っていないが）、OH Sのスリットをオープンにしてドームを開け視野内に星を入れる。このまま、赤外線カメラの像を用いて望遠鏡の焦点を合わせれば、望遠鏡の焦点をOH Sのスリット上に合わせることができる。次に、望遠鏡・OH S・赤外線カメラの光軸を合わすため、赤外線カメラの位置を大きく変え、星のピンボケ像の状態を調べる（図5-7）。この像は、主鏡・OH Sの Lyot stop（4-1. グレーティング参照）・赤外線カメラの cold stop（4-1. 赤外線カメラ参照）が重なってできている像で、この像を調べることで、星からの光がケラレることなく検出器に到達しているかどうか判る。これら3つの像の中心は、各装置接合部に最も近い平面鏡の角度を変えて合わせることができるが、これは望遠鏡・OH S・赤外線カメラの光軸を合わせることに相当する。また、この調整の際、OH Sの Lyot stop には中心位置を見やすくするために斜めの十字



Primary
mirror



Lyot
stop



Cold
stop

図5-7

明るい星のピンボケ像
各装置の光軸を合わせる
ため、焦点面外での星の
像を調べ、主鏡・Lyot
stop・cold stop の位置
を平面鏡の調整をするこ
とにより合わせる。Lyot
stop には中心位置を確認
するための斜め十字が取
り付けられている。

が取り付けられる（調整後は取り外す）。cold stop 中心の円盤は、主鏡中心の穴から入って来る熱輻射を抑えるためのもので、その円盤は細い十字によって支えられている。この調整後、再び赤外線カメラを元の位置に戻すと、全ての観測装置の結像面と光軸が調整された状態となる。

しかし、これではまだ夜光マスクの位置が正確に合わせられていない。夜光マスク上では、焦点があっていることも重要であるが、最も重要なことは各波長の到達位置と夜光マスクの関係、すなわち、波長分散の倍率が夜光マスクに正確に合っていることである。夜光マスクの位置がカメラミラーに近いほど波長間隔は広く、カメラミラーから離れるほど波長間隔は狭くなる（図2-10参照）ために、マスクミラーの前後の位置を動かすことで波長分散の倍率を、夜光マスクのパターンと合わせることができる。この位置を具体的に確認するには、夜光マスクを半分ずつ隠してオープンスリットで露出し、検出器上でのダークレーンの位置（図5-3）を調べれば良い。夜光マスクが正しい場所にあるとき、どちら側を用いてもダークレーンの位置は変化しないが、夜光マスクが正しい場所からずれているときは、夜光マスクの右半分と左半分で作られるダークレーンの位置は一致せず、ダークレーンが「ぼやけた」状態になる。夜光マスク上での結像精度は、夜光マスクが正しい位置に調整されてもなお、ぼやけている場合はコリメータの位置を動かすことにより調節する（正確に焦点を合わせるには以下に述べるArランプを用いた方法が必要である）。また、この調節の際、夜光マスクやコリメータを動かすと、OHSの最終像面位置が変化するが、光路追跡計算により、コリメータ移動量：カメラ位置移動量 = 1 : 0.11、夜光マスク位置移動量：カメラ位置移動量 = 1 : 0.95の関係であることが判っているため、この関係で赤外線カメラの位置を移動させるのである。

夜光マスク上での結像精度は、OHSのスリット外側に取り付けられたArランプを、細いスリットを用いてスキャンすることにより、Arのある特定の輝線が夜光マスクにちょうど重なる場合があり、その時の輝線の隠れ方で夜光マスク上でのスリット像のボケの

大きさを調べることができる。しかし、この方法は時間がかかるため、頻繁に行なうことはできない。

5-1-5. 結像精度

検出素子上での結像精度は、OHSのピンホールとドームライトを用いて調べることができる。OHSの入射光は $F/31$ であるのに対し、検出素子上では $F/10$ で集光しているため、ピンホール像の縮小率は $10/31$ であり、 $300\mu\text{m}$ の大きさを持つピンホールは約 $100\mu\text{m}$ の大きさで検出器上に写る。検出器の一つの素子(pixel)の大きさは $40\mu\text{m}$ であるため、ピンホール像は収差によるボケが無い場合2.5 pixelの大きさとなるが、実際は収差があるためもう少し広がって検出される。これまでの試験観測では、ピンホール像の大きさは、ほぼ3.5 pixelとなっており1 pixel程度の収差による広がりが認められた。これは光路追跡計算の結果(図2-13)と一致しており、検出器上での結像の状態は完全であることが確認された。星像の大きさは、大気の揺らぎによる広がり収差による広がりとの和で決まるが、大気の揺らぎにより広がり、良い状態の場合0.7 arcsec程度で、約1.8 pixel(1 pixelは0.385 arcsec)に相当し、収差による広がりを合わせて、星像は状態の良い日には3 pixel弱の大きさを持つ。

分光時の結像精度は、現在、やや問題がある。平面鏡をプリズムに替えることによって最終結像面が傾いてしまい、全ての波長において同時に焦点を合わせることができないのである(全面が均一な大きさの像にしたとき、像のボケの大きさは2~3 pixelに広がっており(図5-13)、予想される計算値(図2-13)の2~3倍に達している)。これはプリズムの部分での光が十分平行光になっておらず、そのために軸上色収差が発生しているものと考えられる。プリズムの位置での光線の平行度は、マスクミラーの位置で決められており、そのマスクミラーの位置は夜光マスク上での波長分散の倍率と、夜光マスクのサイズによってのみ定められているため、適切なサイズの夜光マスクを製作すること以外にこの問題を解決する方法はない。次回の観測では夜光マスクのサイズを少しだけ変えることによってマスクミラーの位置を変え、プリズムの部分での光線の平行度を良くすることを予定している。

夜光マスク上での結像精度を直接調べることは困難であるが、夜光マスク上での波長方向の結像精度に関しては、Arランプをスリット位置を少しずつ変えて分光する事により調べることができる。入射光は $F/31$ であるのに対し、夜光マスク上では $F15.5$ で集光するので、縮小率は $1/2$ 、すなわち $500\mu\text{m}$ 幅のスリットの像は $250\mu\text{m}$ の幅を持ち、スリット位置を $500\mu\text{m}$ 移動させると、夜光マスク上でのスリット像の位置は $250\mu\text{m}$ 移動することになる。Arの輝線の近くに夜光輝線のマスクがある場合、スリットを少し動かして夜光輝線マスク上にArの輝線を重ねることができる。しかし、OHSは最終的な波長分解能が約100と低いために、Ar輝線の間隔が狭いところでは近くの輝線と混ざってしまい、輝線強度の変化を正確に調べることができないため、この様な方法で夜光マスク上での結像精度を調べることができる部分は2カ所に限られている。図5-8は $500\mu\text{m}$ のスリットを用い、スリット位置をずらしながらAr輝線の強度変化を測定したものである。スリット位置が $-3.4\sim-2.9\text{mm}$ にかけて輝線強度は減少

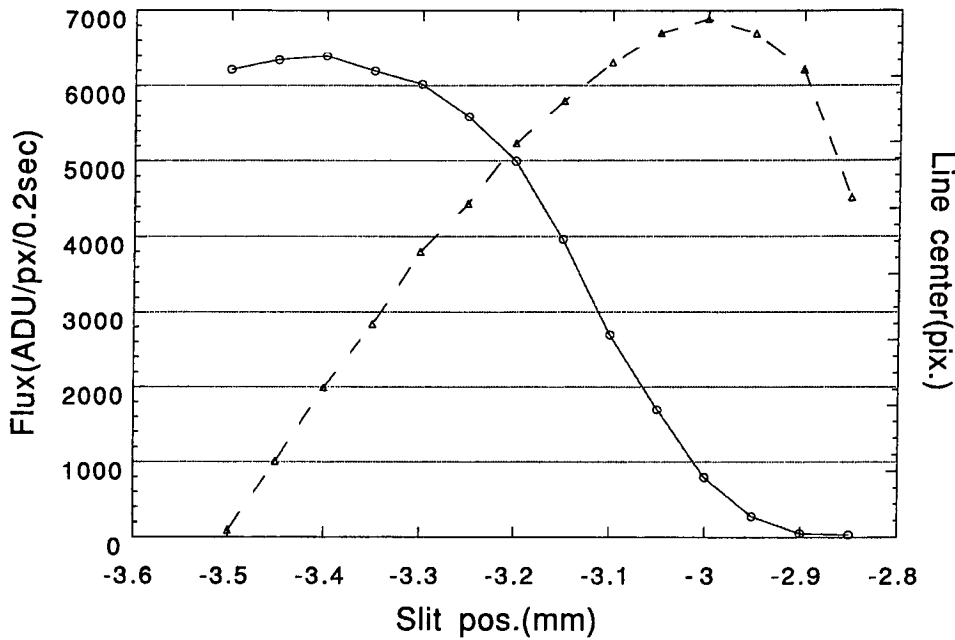


図5-8 スリット移動に伴うAr輝線の強度変化
 実線は輝線強度で、破線は検出器上での輝線の中心位置の移動を表す。スリット移動量500 μ mは夜光マスク上では250 μ mに相当し、スリット像の幅が確認できる。輝線は端から隠れていくため、重心位置は移動しなくなり、確認しにくくなる。

し、夜光マスク内に輝線が隠れていった様子が判る。このことから、夜光マスク上でのスリット像の幅は250 μ m程度で、光路追跡計算の結果(図2-11)通り波長方向の広がりほとんど無いことが確認できた。

5-1-6. 月の影響

月は、可視光では非常に明るく光っているが、赤外では月自体の明るさが暗くなることと、背景光が明るくなることなどにより、通常の赤外線での観測では月はあまり観測の支障とはならない。しかし、OHSによる観測では、波長が可視光にかなり近いことと、背景光が極度に弱められるために、月の光が観測に与える影響は大きいと予想された。第二回の試験観測では、月の周辺での夜光除去された空の明るさを調べ、月の光がOHSでの

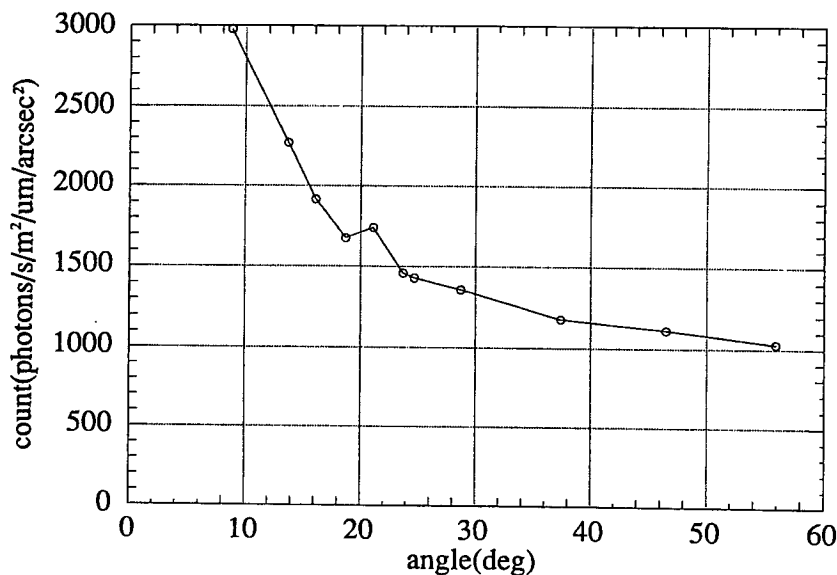


図5-9 月からの角度と空の明るさの関係
 横軸は月からの角度、縦軸は空の明るさで、月のない夜光除去された空の明るさは約1000 photon/s/m²/μm/arcsec²であった。

観測に与える影響を調査した（図5-9）。観測日は半月であったが、月からの角度が 40° 以内の範囲では、月の影響による空の明るさの増加が認められ（夜光除去されていなければそれほど問題とはならない量ではあるが）、OHSの観測に影響を与えることが判明した。月の明るさは、半月から満月にかけて急激に増加するため、この結果よりOHSでの観測は半月よりも暗い状態が望ましく、月から 40° 以上離れて観測すべきであることが判った。

5-1-7. 透過特性と感度補正

天体の像の、検出器上での位置の違いによる感度の変化は、①検出素子の量子効率の場所による違い、②OHSと赤外線カメラの組合せによる視野周辺部での光のケラレ、③OHS自体の透過特性、の3つの原因が重なって発生している。まず、①を補正するために赤外線カメラ単独での感度ムラを調べる必要があるため、OHS光学系の最終部付近に間接照明による光源を設置し、赤外線カメラ単独での感度特性を調べた（図5-10）。検

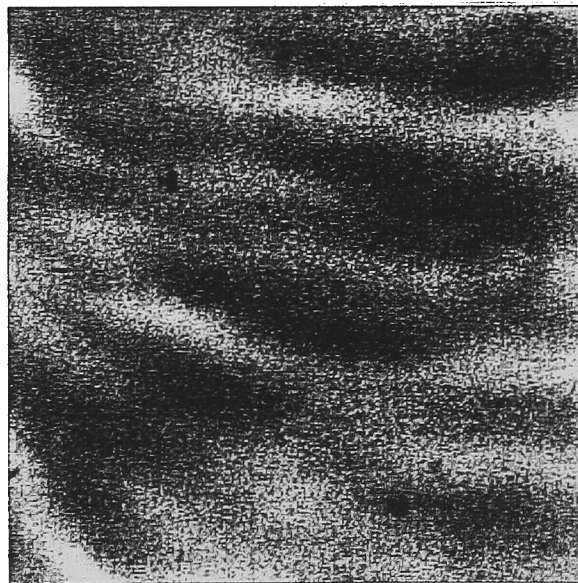


図5-10 検出素子の場所による感度の変化
OHSの光学系の最終部付近に、間接照明による光源を設置し、赤外線カメラの感度特性を調べたもの。感度最大部と最小部の感度比は約2。

出器全体にわたっての「うねり」は、ほぼ全て検出素子の感度ムラによるもので、感度最大の部分と感度最小の部分には約2倍の違いがある（観測の際には、できる限り感度の良い部分を用いて観測をすることが重要）。また、検出素子の感度は波長によって異なるため、観測に使用した全てのフィルターに対して、感度特性は調べられた。図5-11はJバンドの結果をHバンドの結果で割ったもので、波長による感度特性の変化を示したものである（非常に小さい変化を強調して示している）。大きいドーナツ状の明るい部分は「ダストリング」と呼ばれ、鏡面やレンズ面に付着した塵による散乱である。短い波長は散乱の影響を受けやすいため、この様に明るく写っており、大きく広がっているのは、散乱位置がカメラ入射窓より離れているためピンボケの状態になっているためである（中心の凹みはカメラの cold stop によるものである）。数多く存在する小さく明るい点は、赤外線カメラ入射窓に付着した塵によるダストリングで、入射像面位置に近い部分に存在するため

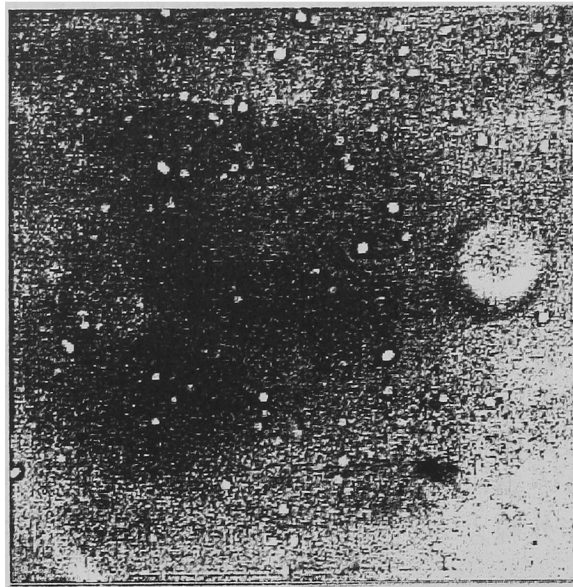


図5-11 塵の影響
Jバンドの感度補正フレームをHバンドの結果で割ったもの。塵による散乱で光のあたり方が波長によって違っている。塵の影響による光のあたり方の変化は2%程度である。

ボケの大きさは小さい。この様なダストリングは感度補正の際に最大で2%程度の影響を及ぼすが測定精度を決定するほどの原因とはなっていない。また、検出素子中央部は相対的に長い波長に対しての感度が良く、周辺部はその反対の傾向を持つこともこの結果より判る。

検出素子の感度ムラの次に、②③の装置の光学特性を補正する必要がある。最も簡単な補正方法として、望遠鏡のドーム内壁をライトで照らし、望遠鏡・観測装置を通してその明るさのムラを調べる方法である。望遠鏡は無限遠に対して焦点が合わせられているため、OHS入射スリット位置では完全にぼけたドーム内壁の像となっており、OHSの側から見れば均一の明るさでスリットが光っている様に見える。図5-12はこの様な方法で撮

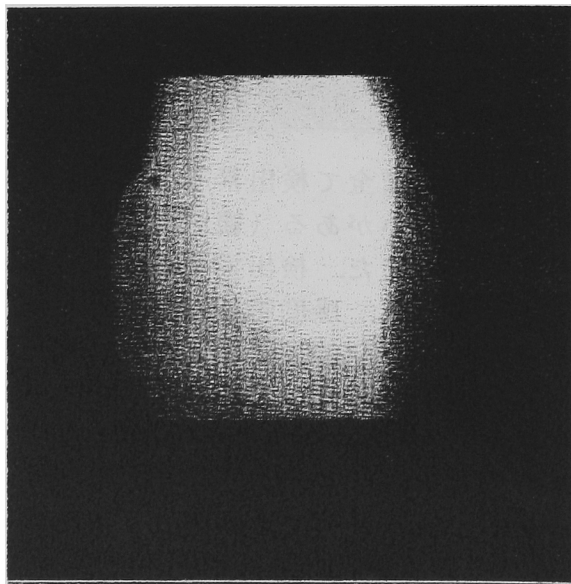


図5-12
ドームライトを用いたオープンスリットの像
空を見たときの明るさの変化(図5-3)が再現されていない。

ったオープンスリットの像であるが、図5-3と比較すると判るように、空を見たときの状態と比べて明るい部分の中心位置が一致していない。これは、即ち「ドーム内壁を照らす方法では空を見たときの状態を再現できない」ことを表している。やはり、根本的な原因はドーム内壁を完全に均一な明るさで照らすことができないことによるもので、検出器に到達する光は、場所により光束内部のケラレる部分が異なるため、ドーム内部の明るい部分からの光がケラレるか暗い部分からの光がケラレるかによって、明るさのムラをつくるものと考えられる。よって、この方法では装置の光学特性をうまく補正することはできない。

装置の光学特性を補正する方法として、空を利用する方法がある。可視光では空は明るくないために光源として用いることはできないが、赤外では空は十分に明るく、空自体を光源として用いて装置の光学特性を補正することができる。OHSは観測として用いる部分は夜光が除去されているため、空を光源とすることはできないが、ダークレーン両側の明るい部分(図5-3)を用いてダークレーン内部の光学特性を補正することができる。即ち、ダークレーン両側の明るい部分を細い幅で切り出し、ダークレーン(またはスリット)の長さ方向の光学特性を、両側の部分を平均した明るさの変化を用いて一次元的に補正するのである(幅方向の補正は行なわない)。

これらの方法により、検出素子の感度、光学特性の補正が行なわれるが、分光の際の光学特性の補正には空を用いることはできない。分光の際の光学特性の補正は平らなスペクトルを持った光源が必要で、J・Hバンドでの空のスペクトルは全くその逆の輝線ばかりのスペクトルだからである(そのために「除去」できるのであるが)。現在までの観測では、観測天体近傍の、温度(スペクトル型)のわかっている明るい星を、天体を分光観測した直後に同じ状態で観測する(図5-13)事により、波長方向の光学特性の補正をし

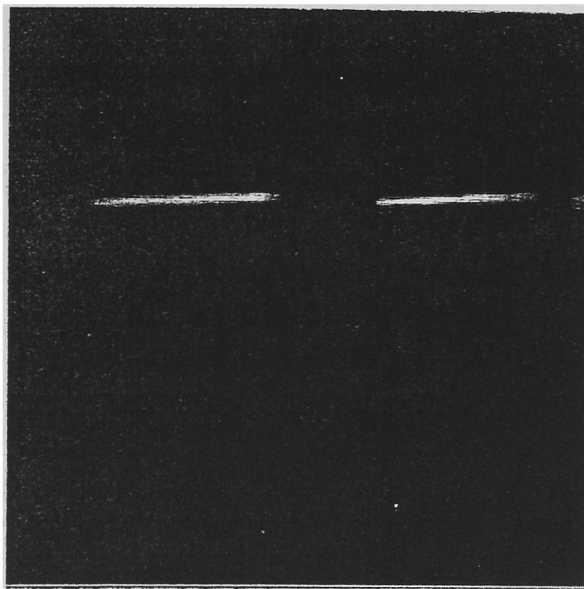


図5-13

星のスペクトル

プリズムによって緩く分散がかけられた光は、横方向に延ばされた像となって検出器に到達する。途中、スペクトルが切れているのは、マスクミラーによるもので、それぞれグレーティングの3・4・5次(5次は用いていない)に対するマスクミラーの像であると考えることができる。

ている。この場合、星は黒体と考えれば、同じ温度の黒体スペクトルを用いて完全に補正できるのであるが、実際の星には吸収線などが多数存在し、スペクトルの平坦性は保証されていない。図5-14はその様な方法で調べた、OHSと赤外線カメラの分光時の波長

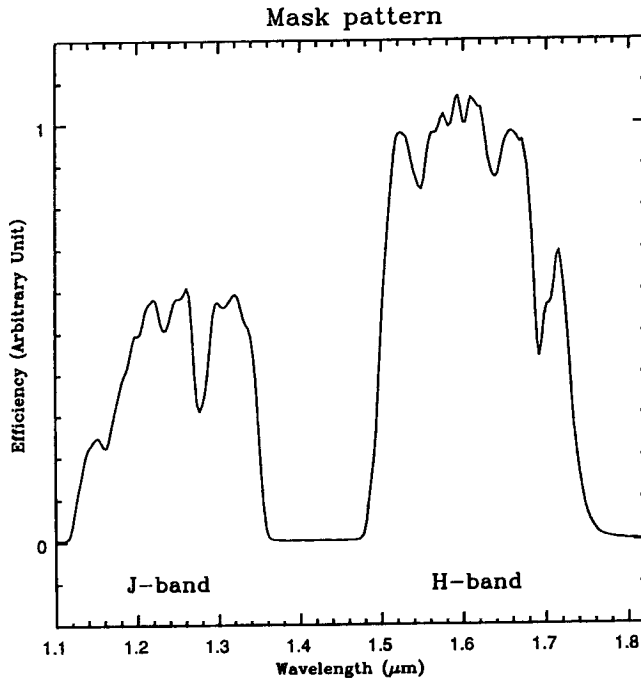


図5-16
分光時の波長特性
スペクトル型のわかって
いる星のスペクトルを、
同じ温度の黒体のスペク
トルで割って補正したも
の。現在までの観測では
この様な感度曲線を用い
て補正をしているが、元
になる星のスペクトルは
必ずしも平坦ではないの
で、やや問題はある。

特性である。この波長特性には、①夜光マスクの透過パターン、②グレーティングの波長特性、③1.72 μmカットオフフィルターの特性、④検出素子の感度特性、⑤地球大気の透過特性、⑥星の吸収線、等が含まれているが、⑥以外は全ての天体に対し同様に現われる効果なので（全く同じ状態で観測することを前提としているが）、この透過特性を用いて感度補正をすることができる。⑥に対する補正は、OHSのスリット近くに熱源を置き、実際の黒体スペクトルを用いて吸収線によるスペクトルの凹凸を補正する方法があるが、その場合は⑤と⑥の区別ができないため、⑤の補正を地球大気モデルを用いて行なう必要が生じる。これまでの観測では、⑥に対する補正を行っていないが、スペクトル標準として用いている星には、図5-17のように様々な形の吸収線による凹凸が存在しており、今後、正確な標準スペクトルをどの様にして得るかが課題となっている。

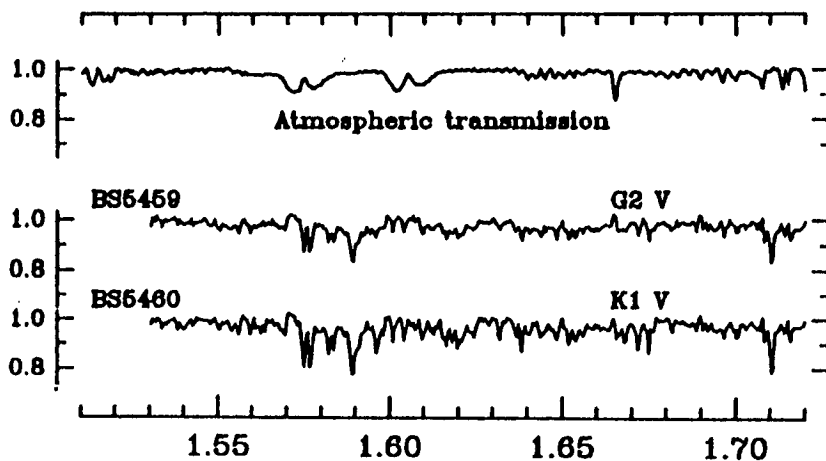


図5-17 主系列低温度星のスペクトル (Origlia et al.1993)
1.5~1.7 μm での標準的な星のスペクトル (波長分解能~1500)。主系列低温度星は比較的吸収線の少ないスペクトルを持つが、低い分解能で分光をした場合でも1割程度の影響を受ける可能性はある。

5-1-8. 装置変形

OHSは約250kgと非常に重い装置であるため、望遠鏡の傾きによって装置が変形し、最終的な天体像の位置が移動する。試験観測期間中の天候の悪い日に、ドーム内で望遠鏡を様々な方向に傾け、最終像の移動量を測定した。測定は、天頂でのピンホール像の位置を原点とし、天頂より東西南北の方向にそれぞれ15°と30°（東西方向は1hと2h）傾けて行なわれ、ピンホール像の位置がどの様に変化するかを調べた（図5-18）。

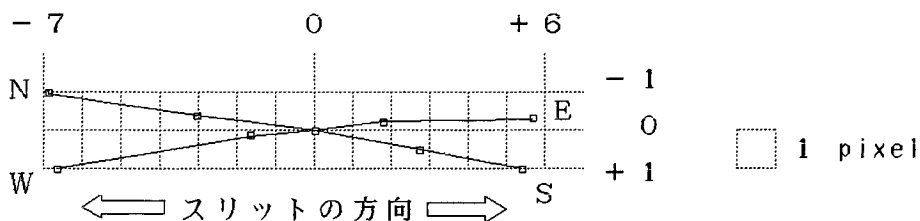


図5-18 望遠鏡の傾きによるピンホール像の移動

東西南北に15°おきに測定したもの。30°望遠鏡が傾くと約6 pixelピンホールの像が移動する。どの方向に傾けてもほぼスリットに沿った方向に移動することが判る。

その結果、どの方向に傾けてもほぼスリットに沿った方向に移動すること、移動量は30°あたり約6 pixel（240μm）であることが判明した。天体を追尾していく場合、2時間で30°変化するため、1分あたりでは約0.05 pixel移動していくことになる。像の移動を引き起こしている原因は、重量が集中しているカメラミラー部分と、赤外線カメラ部分であると考えられ、装置が南北（OHSの長い辺の方向）に傾いた際には基盤の変形によるカメラミラーの角度の変化、東西に傾いた際には赤外線カメラステージのねじれ変形によるカメラ自身の位置の変化が発生しているものと思われる（どちらの変形もほぼ同じ方向に像を移動させる）。現在、赤外線カメラステージの補強を予定しているが、装置の変形を極力減らし、一回の観測あたりの露出時間を少しでも長くすることは、OHSでの観測にとって重要な課題である。

5-1-9. ノイズ源

第三回試験観測では、現在の観測のノイズ源に付いて詳しい検査がなされた。天体からの光以外でノイズ源として考えられるものは、①除去されずに残っている夜光、②赤外線カメラ入射窓から入って来る熱輻射、③検出素子の暗電流、④検出素子の読みだしノイズの4つが考えられ、①～③は積分時間に比例して増える量、④は積分時間に関係なく一定の値である。また、①②は検出器上でのF比により増減する（即ち、カメラ光学系の拡大率によって変動する）量であるが、③④は光学系には関係しない量である。第三回試験観測では、赤外線カメラは1:1（最終F/10）の光学系を用い、標準的な積分時間は2

40秒であったが、この場合のこれらのノイズ源の比率を、1秒・1 pixelあたりでの電子数に換算して比較したところ、表5-5の様になった。

ノイズ源	H測光	J測光	分光
残っている夜光	1.0	2.4	0.55
熱輻射	4.3	0.44	1.8
暗電流	>0.8	>0.8	>0.8
読みだしノイズ	~1.7	~1.7	~1.7

表5-5
ノイズ源の内訳
240秒の露出の場合に
付いての、1秒あたりの
平均値で比較したもの。
単位は electron/s/pixel

この結果、測光観測の場合は夜光除去率が1/18 (Jバンドの場合は約1/9)と、まだ不足しているため、まだ抜け残った夜光の光が主なノイズ源となっている。しかし、分光観測の場合は、熱輻射と読みだしノイズが主なノイズ源となっており、もはや夜光は暗電流以下の強度になってしまっている。読みだしノイズの寄与は、積分時間を長くすることによって抑えることができるが、熱輻射を抑えることはそれほど簡単なことではない。現在のOHSは、プリズムが常温であるため、夜光と天体からの光は分光され薄められてしまうが、装置内部の熱輻射は薄められることなく赤外線カメラに入射する。更に、OHSはこの波長帯で圧倒的に強い夜光輝線を大幅に減らしているため、通常、2μm以下の波長では問題とならない熱輻射成分が問題となってくるのである。熱輻射を減らすためには、熱輻射の強い長波長側の光をフィルターで抑えて検出器に到達しないようにする必要はあるが、できる限り長い波長まで観測するためには、カットする光は必要最小限でなくてはならない。夜光除去率1/30を達成した場合、分光時には理論上では1.72μmまでの熱輻射が、残っている夜光成分と同じ強さの光となる(表3-6)。第三回試験観測では1.72~約2.5μm(検出器の感度限界は約2.5μm)までの熱輻射を抑える1.72μmカットオフフィルターを用いたが、フィルター及びフィルター保持部周辺からと思われる熱輻射のもれが非常に大きかったため、1.9μmカットオフフィルターも平行に並べて使用した。それにも関わらず、表5-5のように依然熱輻射成分は強い。この原因として第一に考えられることは、波長2.5μm付近の光の影響である。図5-19は、第三回試験観測で用いたフィルターの透過率理論曲線であるが、検出器の感度がなくなる波長2.5μm付近で、10⁻³程度の光を透過している。検出器の感度は波長2.5μm前後で急激に0となるため微妙ではあるが、この部分での熱輻射は1.7μm付近での熱輻射の3000倍の強度があり、影響している可能性は十分にある。次に考えられることは、フィルター及びフィルター保持部からのもれ込みである。赤外線カメラ内面は金属面が直接現われているため、内部での多重反射による細かい隙間からのもれがある可能性がある。もう一つの原因は、cold stop(図5-7)が大きいことである。本来、cold stopは主鏡像と同じ大きさでつくられるべきであるが、光のケラレの危険性を減らすため最も理想的な大きさよりもやや大きめにつくってある。これにより、熱輻射は数割余計に入射することになる。現在の所、1.72μmカットオフフィルターを2.5μm付近で

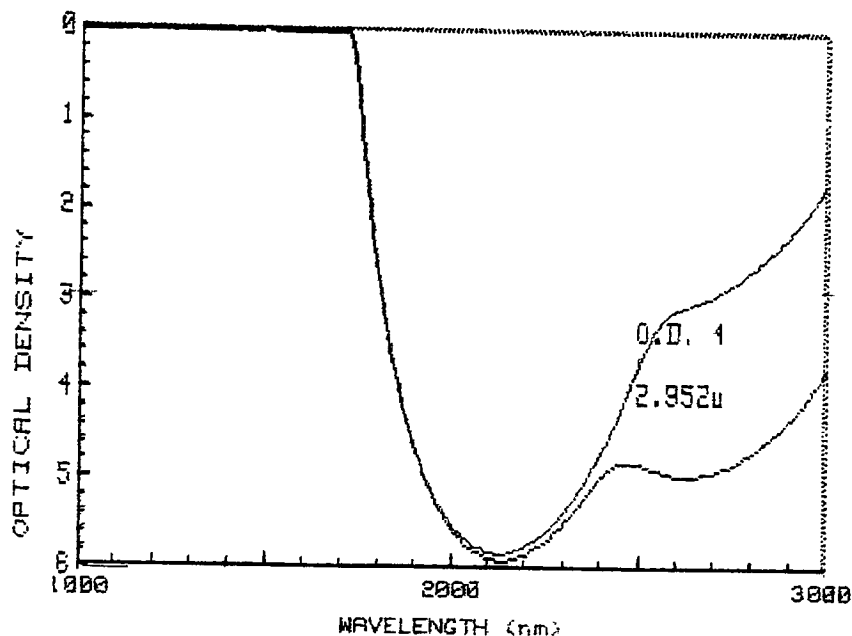


図5-19
1. 72 μ mカットオフフィルターの理論透過率
上側の曲線が前回使用のもの、下側の曲線が次回使用予定のものである。
横軸は波長で、縦軸は $-1 \log$ (透過率) を表す。

も十分熱輻射が抑えられるもの（図5-19）に作り替えているが、その他の原因に関しては現在、改善を検討中である。

これまでの観測では赤外線カメラを主に1:1の光学系で用いてきたが、2:1の縮小光学系にする事によって、素子の暗電流と読みだしノイズの寄与を減らすことができる（外からの光が狭い部分にたくさん集められるため、素子自身の持つノイズ成分の寄与が小さくなる）。しかし、縮小光学系では、天体からの光の情報数が減り（天体が小さく写る）、不良素子（乱数的に発生するものも含めて）が天体像や天体スペクトルの中に入ってきたときの補正が難しくなることと、空間的な分解能が悪くなることから、1:1の光学系を今後も用いていく方針である。そのため、熱輻射を下げ、積分時間を長くして読みだしノイズの寄与を減らしても、分光時のノイズ源は暗電流が減らない限り夜光とはならない（表3-6は2:1光学系に対しての計算のため、暗電流の寄与は小さい）。この点に於て、現在の装置でこれ以上夜光除去率を上げることは、分光時のSNを上げることはならないが（もちろん、熱輻射と読みだしノイズの寄与を抑えればSNは向上する）、将来の大型望遠鏡のためのプロトタイプ的な装置の役割として、夜光除去率の限界を目指すことは重要である。

5-2. 観測

現在までの3回の観測では、試験観測の他、天文学的に興味深い遠方のクエーサーや銀河、重力レンズ天体等をいくつか観測した。ここではその内の3つ、B2 1225+317（クエーサー）、MG0414+0534（ブレーザー？）、Hawaii 167（スターバースト銀河？）について、観測結果を紹介し、考察を行なう。尚、観測結果の解析は全て、天文データ解析ソフトIRAFを用いて行なわれた。

5-2-1. B2 1225+317

この天体は、 $z=2.219$ の radio loud (電波を強く放射する) quasar で、J・Hバンドでは、まだ分光観測が行なわれていなかったため、試験観測も兼ねて第二回観測時に測光・分光観測を行なった。観測日は1993年3月15日で、この日は強風ではあったが特に悪い天候ではなく、順調に観測を行なうことができた。観測手順は、まず、目標天体近傍で、測光標準のための微光標準星 (faint standard star) をオープンスリットで観測し、次に、位置標準となる明るい星へ移動して原点を定めた後、そこからの相対座標で目標天体へ移動する。オープンスリットで目標天体を捕らえることができたなら、位置 (望遠鏡の方向) を微調整してダークレーン (図5-3) 中央に移動させ測光観測を行なう (明るい天体の場合、オープンスリットでも測光観測は十分可能)。測光観測が終了したら、ダークレーン上にスリットを移動させ、プリズムを用いて分光観測を行ない、最後にそのままの状態ですペクトル型の判っている (F型かG型の) 明るい星へ移動し、モニタ用CCDでスリット内に星を入れ、スペクトル更正用の分光観測を行なう。各観測は、ダークレーン (スリット) に沿った数カ所での露出で一組となっており、互いに差し引くことにより、天体の成分だけを取り出し、検出素子間の感度補正を行なった後、ほぼ同様な場所に写っている天体と標準星の強度を比較して光度を測定した。分光データはスリット中央に天体が入っている明るいものだけを選んで、波長特性などを補正した後平均化し、測光観測で得られた光度で規格化した。解析の結果を表5-6、図5-20に示す。測光観測はHバンドでしか行なわなかったが、スペクトルはJ・Hバンド同時に測定されるため、Hバンドでの明るさが判れば、Jバンドでの明るさも求められる。また、分光観測は4回の露出を行なったが、その内の一つは入射強度が不足していたため最終的には用いていない。

観測モード	積分時間	結果
Hバンド測光 分光	30秒×2 240秒×4	H = 13.9等 図5-20

表5-6 radio loud quasar: B2 1225+317 (z=2.219) 観測内容

この天体は、1978年に Puetter ら (Puetter et al.1981) がJ・Hバンドでの測光観測をしており、Jバンドで14.9等、Hバンドで14.4等という結果であった。今回の観測結果はそれに対し0.5等 (約1.6倍) 明るい結果となったが、一般にクエーサーは変光の性質を持ち、この天体も過去にこの程度の明るさの変化があった (Mullikin et al.1977) ため、十数年の間に明るさが変化したのではないかと考えられる。この天体は $z=2.219$ であるため、Hバンド ($1.65\mu\text{m}$) での測光は、静止波長 (天体の位置での波長) で可視光のB~Vバンドでの測光に相当し、これより絶対等級 ($10\text{ pc} = 32.6$ 光年から見た天体の等級) を計算することができる。Hバンドで13.9等の明るさは、単位波長あたりの輻射エネルギー密度 f_λ に換算すると式(3-2-1.a)より、

$$f \lambda = 1.12 \times 10^{-6} \times 10^{(-13.9/2.5)}$$

$$= 3.08 \times 10^{-12} \quad \text{erg/s/cm}^2/\mu\text{m}$$

となる。天体は $z=2.219$ の位置にあるため、ハッブル定数 $H_0=75\text{kms}^{-1}/\text{Mpc}$ 、減速パラメータ $q_0=0.25$ とした場合、光度距離 D_L (6-2-2. 参照) は、

$$D_L = 1.38 \times 10^{10} \quad \text{pc}$$

となり、天体の明るさは $D_L^2(1+z)$ に反比例するため (6-2-2. 参照)、 10 pc の位置での輻射エネルギー密度は、

$$f \lambda' = f \lambda \times D_L^2 (1+z) / 10^2$$

$$= 1.89 \times 10^7 \quad \text{erg/s/cm}^2/\mu\text{m}$$

これを B バンドでの等級に換算すると式 (3-2-1.a) より

$$M_B = -2.5 \times \log (f \lambda' / 7.20 \times 10^{-6})$$

$$= -28.5 \quad \text{mag}$$

となる。 $z > 2$ クエーサーは近傍のものに比べ明るいことが知られているが、それでも通常は $-23 > M_B > -27$ で、それより明るいものは $-27 > M_B > -30$ にかけて急激に減少するため (Boyle et al. 1988)、このクエーサーはかなり明るい部類に属するものであるといえる。

分光観測の結果は、図 5-20 に示されるようになった。H バンドのスペクトルは S/N 良く観測することができたが、J バンドのスペクトルは、分光時の J バンドの結像状態が悪かったため、J バンド短波長側での波長特性補正はあまり信用できないものとなってしまった (J バンドでの測光観測をしなかったことも原因の一つではあるが)。輝線は、 $H\beta$ (水素原子バルマー線、 4861\AA)・ $[O\text{III}]\lambda 5007$ ・ $Fe\text{II}$ (多数の輝線の集合体) が観測され、連続スペクトルに対する輝線強度を表す等価幅 (equivalent width: 輝線強度と同じ強度になる連続スペクトルの波長幅のことで、ダストによる減光の影響を受けない量である) は、表 5-7 のようになった。

	H β	[O III]
B2 1225+317	26	20
近傍の Quasar	50~80	20~60

表 5-7 B2 1225+317 の輝線等価幅 (\AA)

近傍のクエーサーに比べ、連続スペクトルが数倍強いため等価幅は小さくなっているが、

H β に比べ [O III] が強く出ているように思われる。また、この天体は Fe II 輝線を放射していることが判るが、近傍のクエーサーでは radio loud quasar に多くみられ、[O III] λ 5007 とは負の相関関係があることが判っている (Boroson and Green 1992)。このクエーサーは Fe II \cdot [O III] どちらも出ているが、[O III] λ 5007 付近にも Fe II 輝線が存在し、この輝線は Fe II 輝線である可能性もある。OHS は波長分解能が低く、幅の狭い [O III] 輝線と幅の広い Fe II 輝線の区別をすることができないため、判断をすることは難しい。

近年、 z の大きい遠いクエーサーでも、Fe II の強いものがいくつかあることが確認されており (Hill et al. 1993, Elston et al. 1994)、この天体も我々の観測と全く同時期に Hill らがキットピーク 4 m 望遠鏡で同じ天体を分光観測していたことが後に判明し (Hill et al. 1993)、OHS での観測結果と比較することができた (図 5-21)。彼らの

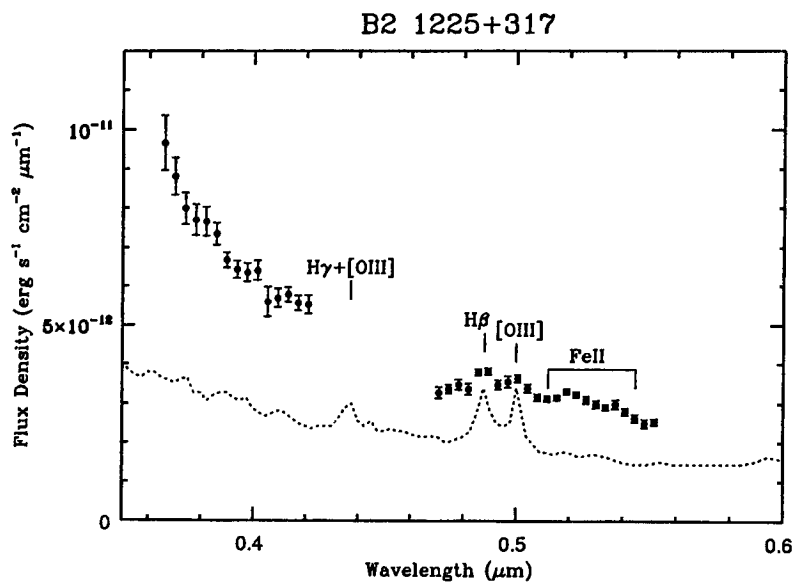
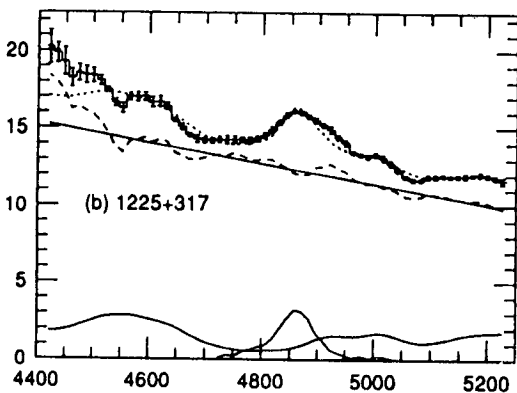


図 5-20 クエーサー B2 1225+317 ($z=2.219$) の分光観測結果
横軸は静止波長、縦軸は輻射エネルギー密度で、点線は典型的なクエーサーの合成スペクトルである。Jバンド短波長側は波長特性の補正にやや問題があ

図 5-21 B2 1225+317 の
スペクトル (Hill et al. 1993)
KPN0 4 m 望遠鏡で 10^4 秒
積分したもの。波長分解能は
300 程度。



観測は我々の観測に比べ、波長分解能3倍であるかわりに口径2倍・積分時間10倍であるため、良いS/Nで観測されている。彼らの観測の結果、 $H\beta$ の等価幅は25Åで我々の結果と一致していたが、[O III]の位置にある膨らみは輝線幅よりFe IIであると判断している。この様に、 $z > 2$ の宇宙（宇宙年齢は現在の20%未満）で鉄が多量に存在していることは、宇宙ができて比較的早い段階に大量の星生成が起こったことを示しており（もしくは星以外でのなんらかの鉄生成過程が存在する）、初期宇宙でのそのような星生成の現場をとらえることが、これからの観測天文学にとって重要な課題となっている。

OHSを用いて輝線観測をする場合、最も問題となるのは夜光マスクと対象天体の輝線の位置関係である。予想される輝線が夜光マスクに入っていないか、常に確認し注意する必要がある。また、OHSは輝線を観測するにはやや波長分解能が低く、本来はこの様な輝線観測は得意ではないが、可視光領域での分光だけでは赤方偏移が決定しにくい $z > 5$ のクエーサー（可視光領域では、輝線はLy α だけしか見えなくなる）の z を決定する際に、OHSは重要な役割を果たすものと考えられる（ $z > 5$ の天体はまだ発見されていない）。

5-2-2. MG0414+0534

この天体は重力レンズ天体で、非常に赤いスペクトルを持つことでも知られている天体である。この天体の可視光でのスペクトル（図5-22）は、他の天体では見られない様な急な傾き（単位振動数あたりの輻射エネルギー密度 $f_\nu \propto \nu^\alpha$ として、 $\alpha = -8.95$ ）を持ち（Hewitt et al.1992）、吸収線らしきものが一カ所あるだけで輝線は一つも見られ

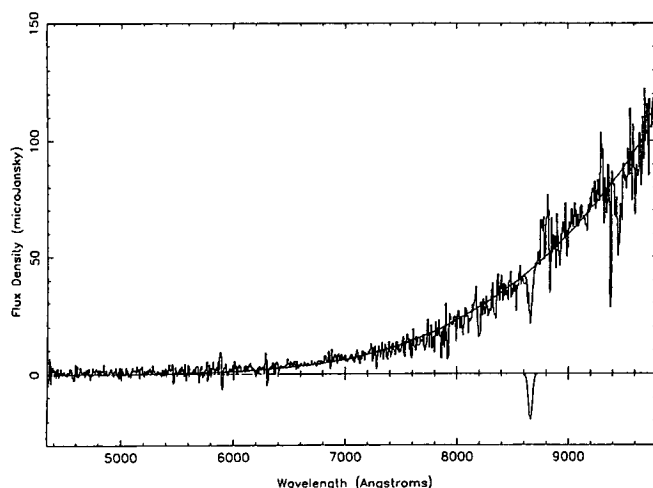


図5-22 MG0414+0534の可視光でのスペクトル（Hewitt et al.1992）非常に急な傾きを持ち、吸収線らしきものが一つあるだけの「奇妙な」スペクトルである。横軸は波長、縦軸は単位振動数あたりの輻射強度で、 $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W/m}^2/\text{Hz}$

ない。電波では周波数5GHz・15GHzでの観測で、通常のクエーサーとほぼ同じスペクトルの傾きを持つ（ $\alpha = -0.75$ ）事が判っている。この天体は、まだ赤外でのスペクトルが得られていないため（測光観測はKバンド（ $2.2\mu\text{m}$ ）で行なわれている）、第三回観測時に撮像観測と分光観測を行なった。観測は1993年10月14日と17日の2回行ない、両日とも天候は十分ではなかったものの、まずまずのデータを得ることができた。観測の手順は前節で述べた手順と同様で、標準星の観測の後、目標天体に移動し撮像観測を行ない、続けて分光観測をし、最後に標準星分光をして1セットを終了する。フ

フィルター交換は時間がかかり、また、検出素子の安定性が損なわれるため、撮像はHバンドフィルターのみで行い、その後分光観測用フィルターに替えて分光観測を行なった。この天体の観測の最後に、Jバンドフィルターでの撮像も試みたが、Jバンドでは天体を捜すことができなかった（原因は不明）。天体はダークレーン幅よりも広がっているため、オープンスリットでの240秒積分を一回の観測とした。天体の位置を変えて撮ったデータを差し引くことによって背景光を除くことができるが、数分にわたる露出の場合、空の明るさの時間変化成分が残り、ダークレーン部分だけが0で（ダークレーン部分も明るさは変化しているが周辺に比べ格段に少ない）、両側の部分は0とはならない。この部分は、まず検出素子の感度を補正し、差し引く前のダークレーン両側の空の明るさを用いてダークレーンに沿った方向の感度を補正した後、0レベルになるように修正する。この様に処理した多数のデータを、天体中心が重なるように平行移動して重ね合わせ、天体付近を切り出して拡大したものを図5-23に示す。

観測モード	積分時間	結果
Hバンド撮像 分光	240秒×10 240秒×5	H = 14.4等 (3" φ) 図5-24

表5-8 重力レンズ天体 MG0414+0534 の観測内容

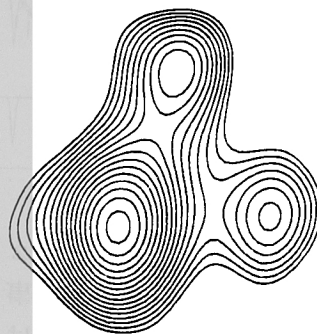
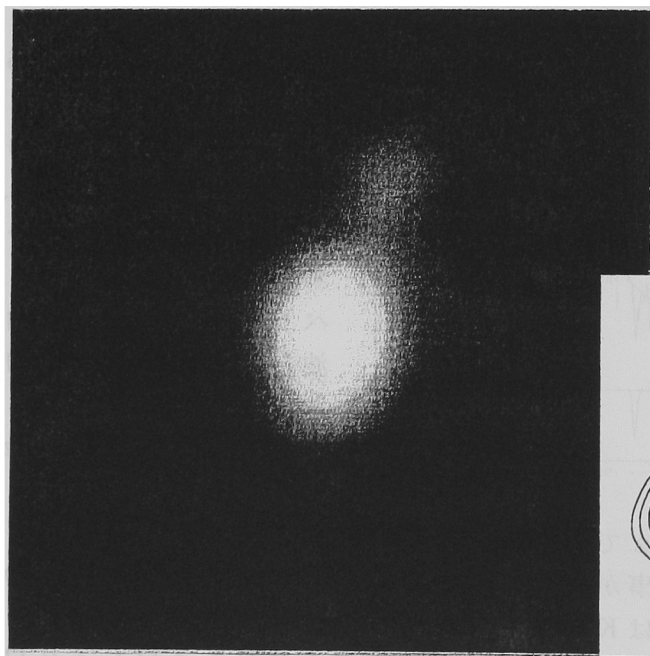


図5-23

MG0414+0534 Hバンド撮像結果

視野一辺は7.7 arcsec、
上が北、右が西である。
明るさの変化は対数表示
3つの成分を明るい順に
A, B, Cとする。右下
は deconvolve (装置と大
気による広がりを取り除
く解析方法) した像で、
コントラスト間隔は0.25
等である。

重力レンズにより3つに分かれた成分（明るいものから順にA, B, Cとする）の相対位置は、他の波長での観測と非常に良く一致し（表5-9）、重力レンズによる分裂像であることが改めて確認された。しかし、各成分の相対的強度は波長により異なり、長い波

長ほど明るさの差が激しく、短い波長ほど差が小さくなる傾向がある（表5-9）。この原因として、

- ①重力レンズ効果による各成分の光の到達時間の差（数日～数百日）と天体の明るさの変化により偶然に発生した
- ②天体の部分的な増光率の違いにより、電波や赤外が強く出ている部分が特に増光されている
- ③重力レンズ源によって、最も明るい成分ほど強く減光されている

波長帯	Aの位置		Cの位置		Bの明るさ	Cの明るさ
R	東 0".60	南 1".9	西 1" 34	南 1" 7	0.461(+0.84)	0.398(+1.00)
I	東 0".67	南 1" 74	西 1" 40	南 1" 69	0.347(+1.15)	0.294(+1.33)
H	東 0".68	南 1".84	西 1".31	南 1" 67	0.249(+1.51)	0.129(+2.22)
K	東 0".66	南 1" 74	西 1".20	南 1" 55	0.256(+1.48)	0.151(+2.05)
5 GHz	東 0".66	南 1" 72	西 1".34	南 1" 64	0.196(+1.77)	0.070(+2.88)

表5-9 MG0414+0534 の3つの成分の位置と明るさ。

R・5 GHzの全データとIの相対的明るさは Hewitt et al.1992

Iの位置データは Schechter and Moore 1993

Kの全データは Annis and Luppino 1993

位置はBを基準とし、明るさはAを基準とする。（）内は等級差で表した値。

等の原因が考えられるが、①②に関しては今回のデータでは検証できないため、ここでは③の可能性について検討する。

電波領域では減光の影響を受けないため、それぞれの成分に付いて電波での等級差を重力レンズ効果による真の明るさの違いと考え、Vバンド（0.55μm）での減光の差を ΔA_V とすると減光の大きさは波長に反比例するため、他の波長でのB・Cの相対的な明るさは、

$$B: 1.77 - \Delta A_V \times 0.55 / \lambda$$

$$C: 2.88 - \Delta A_V \times 0.55 / \lambda$$

と表すことができる。B・Cそれぞれに対し、最小二乗法で ΔA_V を定めた結果を図5-24に示す。すなわち、A成分はBと比較して $\Delta A_V = 1.09$ 等、Cと比較して $\Delta A_V = 2.45$ 等の減光を余分に受けていると考え、波長による明るさの違いをうまく説明することができる。①②等の、他の可能性は否定された訳ではないが、減光量の違いである可能性が高い。

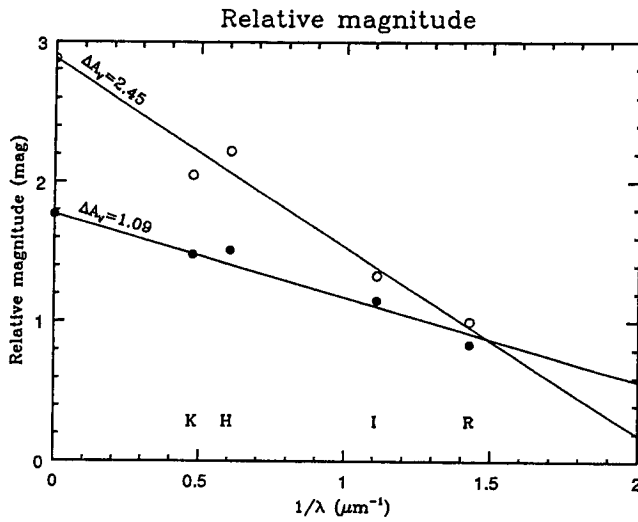


図 5 - 2 4

B・C成分のA成分に対する相対的な明るさ波長による明るさの違いは、減光の度合が異なる (ΔA_v) ためである可能性が高い。黒丸はB成分、白丸はC成分を表す。

図 5 - 2 5、5 - 2 6 に分光観測の結果を示す。今回の観測で明らかになったことは、J・Hバンドでも強い輝線は存在しないこと（波長分解能が低いため、弱い輝線は検出しにくい）、連続スペクトルはJバンド付近で傾きが大きく変わり、R・Kバンドをなめらかにつないだスペクトルとは異なること、が判明した。この天体は輝線が存在しないため

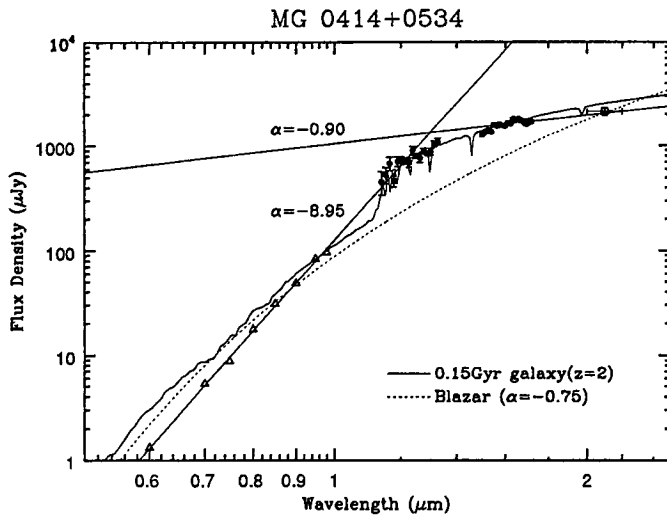


図 5 - 2 5

MG0414+0534 の R~K バンドでのスペクトル三角は Hewitt et al. (1992) の分光データを、Schechter and Moore (1993) の測光値で規格化したもの。Kバンドの測光データは Annis et al. (1993) より。

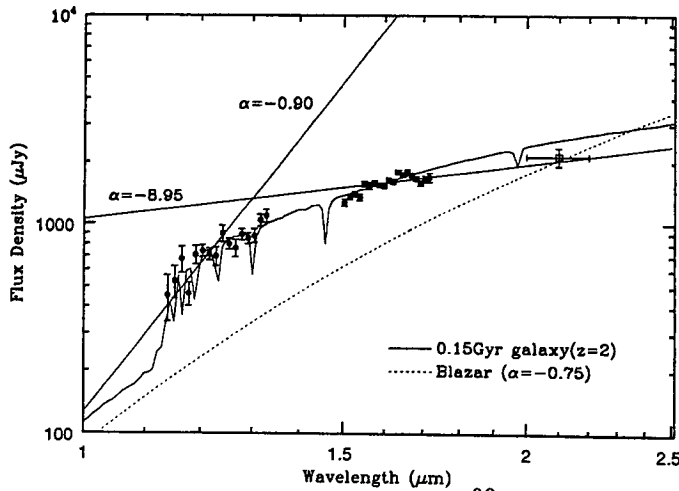


図 5 - 2 6

上図を拡大したもの。横軸は波長、縦軸は単位振動数あたりの輻射強度で $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W/m}^2/\text{Hz}$

赤方偏移 z は全く判らないが、考えられる天体として、銀河とブレーザー（活動銀河核（AGN）をそれに付随するジェットの方から見た天体と考えられ、スペクトルは連続成分が非常に強いため輝線成分が見えないもの）が考えられるが、それぞれの場合に対し以下のようなモデルを考えた。

model A: スターバースト銀河

質量 $10^{12} M_{\odot}$

年齢 0.15 Gyr (0.1 Gyr の間、爆発的に星生成 (starburst) が起こる)

$z = 2.0$

重力レンズ効果 40 倍 (4 等)

減光 $A_v = 9.3 / (1 + z_d)$ 等

z_d : 減光される場所の z

model B: ブレーザー

質量・年齢・ z すべて不明

$f_{\nu} \propto \nu^{-0.75}$ のスペクトルをもつ

重力レンズ効果 40 倍 (4 等)

減光 $A_v = 9.8 / (1 + z_d)$ 等

今回の OHS の観測で、J・Hバンドでスペクトルが大きく折れ曲がっていることが判明し、これは model B では説明することができない。model A では、この部分を A 型・B 型星のスペクトルにみられるバルマー吸収として合わせることができ（その場合天体の赤方偏移は $z = 2$ 程度となる）、 $10^{12} M_{\odot}$ という巨大な質量が非常にせまい範囲に集中している必要があるため（もしくは数百倍の重力レンズ効果が必要）、星の光だけでこのスペクトルを説明することはやや難しい。また、この天体は可視光で 2 年間に 0.2 等 (0.83 倍) の変光が確認されており、これも星の成分だけで（超新星など）説明することはやや難しい（ブレーザーは変光の性質を持つ）。

重力レンズ効果の変化による変光の可能性を調べるために model A に対して重力レンズの簡単なモデル計算を行なった。まず、天体の赤方偏移を z_s 、重力レンズ源の赤方偏移を z_d とおくと、天体までの角径距離 D_s 、レンズ源までの角径距離 D_d 、天体とレンズ源の間の角径距離 D_{ds} は (図 5-27)、

$$D_s = D(0, z_s)$$

$$D_d = D(0, z_d)$$

(Blandford and Narayan 1992)

$$D_{ds} = D(z_d, z_s)$$

$$D(z_1, z_2) = (2c/H_0) \frac{(1 - \Omega_0 - G_1 G_2)(G_1 - G_2)}{\Omega_0^2 (1 + z_1)(1 + z_2)^2}$$

$$G_{1,2} = \sqrt{1 + \Omega_0 z_{1,2}} \quad c: \text{光速}, H_0: \text{ハッブル定数}$$

で与えられる。次に、重力レンズ源に対する天体の方向を θ_s とすると、天体の位置 r_s は、

$$r_s = D_s \theta_s$$

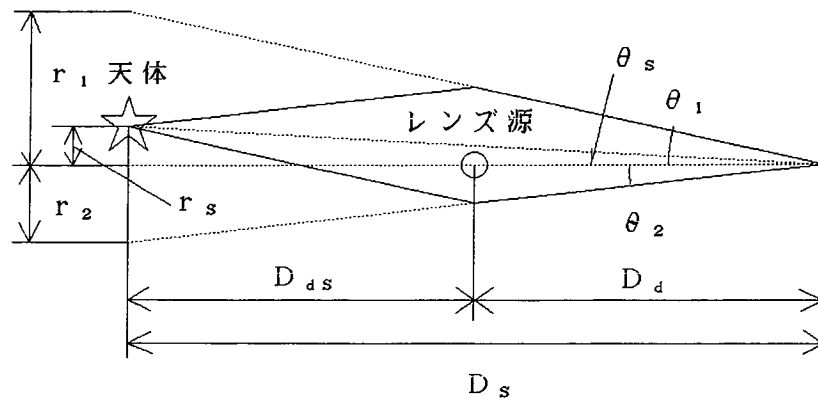


図5-27 重力レンズ

で与えられ、重力レンズの質量を \$M\$ とすると、レンズによってできる像の見かけの位置 \$r\$ は、

$$\begin{aligned}
 r^2 - r_s r - R_0^2 &= 0 \\
 R_0^2 &= 4GM D / c^2 && (\text{Paczynski 1986}) \\
 D &= D_d D_{ds} / D_s && G: \text{万有引力定数}
 \end{aligned}$$

の関係で与えられ、この2つの解を \$r_1 \cdot r_2\$ を用いて、2つの像のレンズ源に対する角度 \$\theta_1 \cdot \theta_2\$ は以下のように与えられる。

$$\begin{aligned}
 \theta_{1,2} &= r_{1,2} / D_s \\
 r_{1,2} &= (r_s \pm \sqrt{(r_s^2 + 4R_0^2)}) / 2
 \end{aligned}$$

2つの像は \$r_s / 2\$ を中心として等距離の場所に対になって現われる。また、2つの像の増光率 (amplification factor) \$A_1 \cdot A_2\$ は、

$$A_{1,2} = a b s (r_{1,2}^4 / (r_{1,2}^4 - R_0^4))$$

で与えられる。\$r_s\$ が小さい場合 \$r_{1,2} = \pm R_0\$ となるため、重力レンズのスケールは

$$\theta_1 - \theta_2 = (r_1 - r_2) / D_s \approx 2R_0 / D_s$$

で与えられる。\$z_s = 2\$ の場合、\$\theta_1 - \theta_2 = 2 \text{ arcsec}\$ とするために必要な最小のレンズ質量は約 \$4 \times 10^{11} M_\odot\$ (\$H_0 = 75 \text{ km/s/Mpc}\$, \$\Omega_0 = 2, q_0 = 0.5\$ としている) で、このとき \$z_d = 0.3 \sim 0.6\$ 程度でこの重力レンズのスケールが得られる。図5-28に \$z_d = 0.3\$ の場合の \$\theta_s\$ と \$\theta_1 \cdot A_1\$ (実線)、\$\theta_2 \cdot A_2\$ (破線) の関係を表す (ただし \$\theta_2\$ は逆符号にしてある)。2つの像の明るさは増光率が高い場合にはほぼ同じで、この簡単な

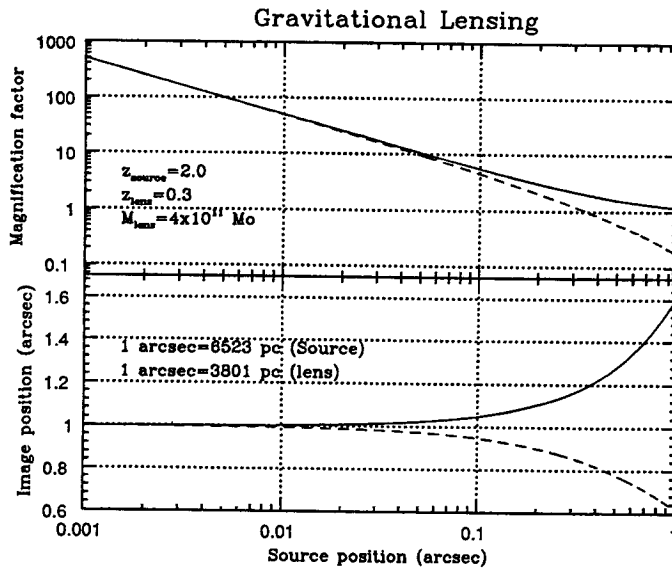


図 5-28
 θ_s と $A_1 \cdot A_2$ の関係と
 θ_s と $\theta_1 \cdot \theta_2$ の関係
 $z_s = 2$ の天体が、 $z_d = 0.3$ のレンズ源に対して受ける重力レンズ効果。横軸は天体の位置 θ_s 、縦軸は増光率 $A_{1,2}$ と像の位置 $\theta_{1,2}$ で、実線は像1、破線は像2を表す(θ_2 は逆符号で表している)

計算では実際の観測を完全に再現することはできないが(詳しい計算は Kochanek 1991)、大体の傾向はつかむことができる。この結果によると $\theta_s < 0.1$ では、ほぼ $A \propto 1/\theta_s$ の関係が成り立っており、可視光で観測されたように2年間で0.83倍の光度変化をするためには、 θ_s は1.2倍変化する必要がある。現在、この天体の重力レンズによる増光率は20~50倍程度と考えられており(Kochanek 1991, Annis and Luppino 1993)、その場合 $\theta_s = 0.01$ arcsec程度であるから、2年間で0.002 arcsec変化する必要がある。 $z_d = 0.3$ では1 arcsecは3800 pcに相当するため、この角度は距離に換算して76 pcとなり、光速(0.31 pc/yr)の10倍以上の速度が必要である。よって、重力レンズで明るさが変化したということは model Aでは考えられない。

次に model Bに対して観測される明るさがブレーザーとして妥当なものであるかを検討する。model Bで、減光分を除いた輻射強度は、

$$f_\nu = 1.26 \times 10^4 \times \lambda^{0.75} \quad \mu\text{Jy}$$

ただし、 $1 \mu\text{Jy} = 10^{-32} \text{ W/m}^2/\text{Hz} = 10^{-29} \text{ erg/s/cm}^2/\text{Hz}$

で、単位振動数あたりの輻射強度 f_ν は単位波長あたりの輻射強度 f_λ と、 $f_\lambda = f_\nu \cdot (c/\lambda^2)$ の関係があるため、この関係を用いて f_λ に変換した後、前節と同様にして様々な z での絶対等級 M_B を計算した(図5-29)。その結果、重力レンズ効果が40倍である場合には、この天体の明るさは $z > 0.5$ のクエーサーの明るさとよく一致し、ブレーザー(本質的にはクエーサーと同じ)の明るさとしては、妥当なものであることが判った。

以上のことより、この天体は明るい中心核を持ったスターバースト銀河で、ジェットの出ている方向から見ているため、ブレーザーとしての性質が強く出ているものであると結論される。また、増光率の大きい明るい成分ほどレンズ天体の中心近くを通過して来るため、大きい減光を受けている可能性が高いことも判った。

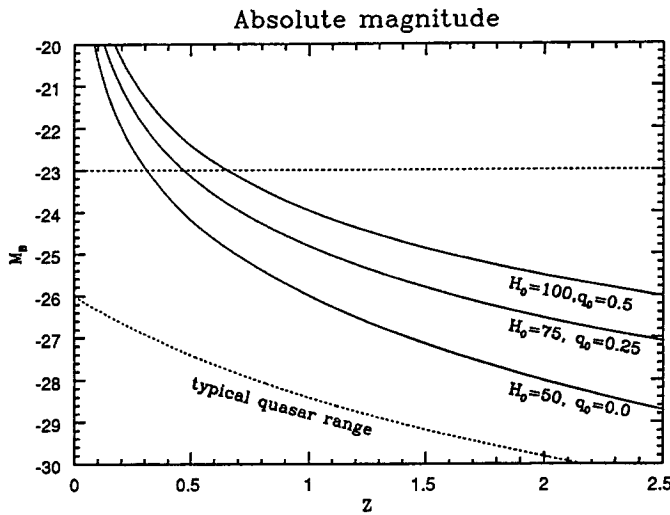


図 5 - 2 9

MG0414+0534 の絶対等級
と z の関係

model B の場合の天体の
絶対等級を、見えている
明るさから逆算したもの。
重力レンズ効果は 40 倍
として計算している。点
線の間部分は、観測さ
れているクエーサーの明
るさの範囲。

5 - 2 - 3. H a w a i i 1 6 7

この天体は、ハワイ大の赤外 K' バンド ($2.1 \mu\text{m}$) サーベイで発見された非常に赤い銀河で、可視光の分光では輝線がなく、吸収線だけが見えていることから、遠方のスターバースト銀河である可能性が高い天体である。赤方偏移は、吸収線より $z = 2.33$ という値が得られているが、吸収源が異なる天体である可能性もあるため、この天体は更に遠い可能性もある。

第 3 回観測では、この天体も観測した。観測は 1993 年 10 月 18 日～22 日の 5 日間行なわれたが、天候が良かったのは最後の 1 日半だけで、他の日はあまり良い観測を行なうことができなかつた。観測方法、解析方法などは前節の MG0414+0534 と同様で、ダークレーンに沿った 6 回の露出で 1 組とした。この天体はかなり暗いため、オープンスリットで観測するよりもスリットを用いて観測する方が良いが、付近に明るい星が多数見えていること、望遠鏡の方向の微小量調節が安定していなかつたため、あえてオープンスリットで観測を行なつた。観測内容と結果を表 5 - 10 に示す。

観測モード	積分時間	結果
J バンド撮像	240 秒 × 9	J = 18.7 等 (3" ϕ)
H バンド撮像	240 秒 × 4	H = 17.7 等 (3" ϕ)
分光	240 秒 × 6	図 5 - 3 2、5 - 3 4

表 5 - 1 0 の観測内容

H バンド撮像と分光は他にも多くの時間観測したが、ダークレーンやスリット上に天体を捕らえることができなかつたため良いデータではなかつた。しかし、最終日に天体自動追

尾用の X Y ガイダー（視野内の星の微小移動量を監視する CCD カメラ）を用いた新しい手法により、ダークレーン中央に天体を捕らえることができ、分光観測も行なうことができた。図 5-30 に H バンド撮像の結果を示す。天体はダークレーン中央にあり、周囲に 4 つの星が写っている（黒や白の縞模様や黒い像は解析の結果現われたもの）。ダークレ

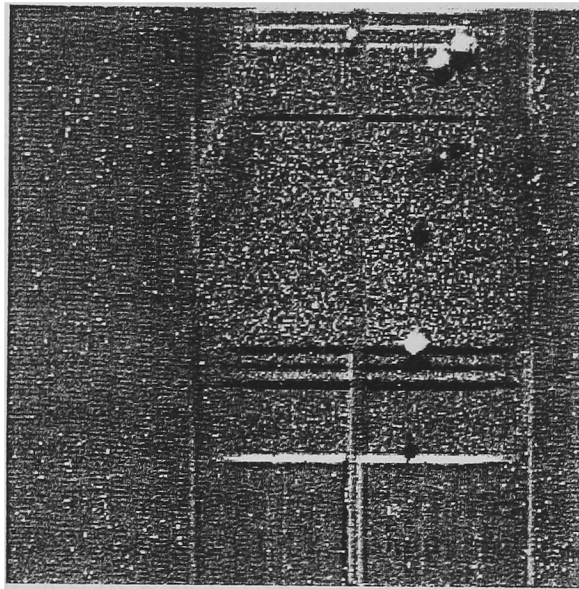


図 5-30
Hawaii 167 の H バンド
撮像観測結果
OHS の視野は右上の部分で、その中央に写っている天体が Hawaii 167 である。

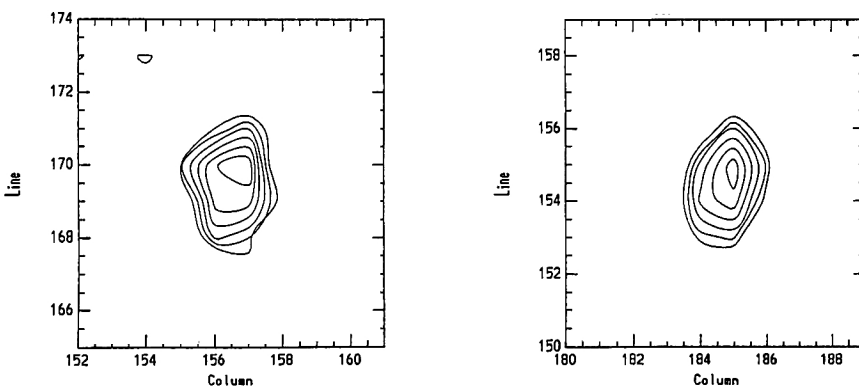


図 5-31
Hawaii 167 の広がり
左は Hawaii 167、右は比較のための付近の星の広がり、ほぼ同じ広がりであることが判る。コントラスト間隔は面輝度 0.25 等を表す。

ーン両側の部分は S/N が悪いためにノイズが多いが、ダークレーン上はノイズが小さいことが判る。天体はほぼ点光源として観測されており（図 5-31）、銀河であるかどうかは像の広がりからは判断することはできない。分光観測は図 5-32 に示されているように、非常に低いレベルではあるが観測することはできた。天候の都合上、最終日は 4 分 × 6 回の分光観測しか行なうことができず、S/N が不足した結果となったが、H 等級で 18 等という非常に暗い天体の分光観測を行なうことができるという OHS の能力を示すことはできた。この天体は、その後 UKIRT 3.8 m 望遠鏡の冷却グレーティング分光器 CGS 4 によって分光観測され、K バンドで強い H α 輝線が検出された。これより、この天体の赤方偏移は $z = 2.354$ であることが判明した（可視光の吸収線の z はこれより少し小さいため、吸収源はこの天体の少し手前に存在する）。

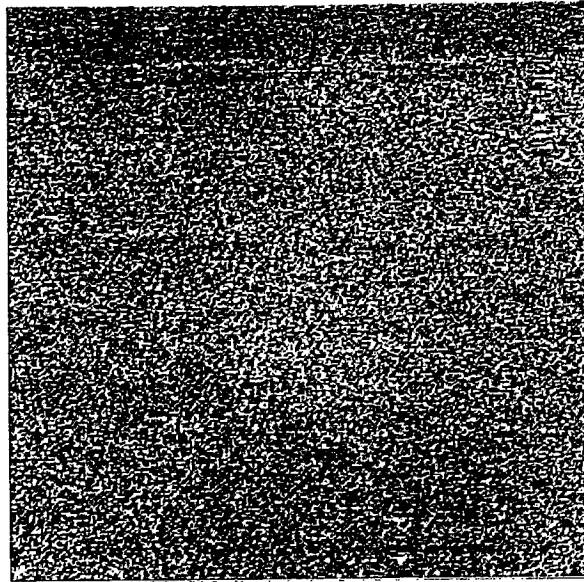


図5-32 Hawaii 167
の分光観測結果
中央付近に写る薄い横線
が天体のスペクトル（上
端の線は関係のない星）。
積分時間は4分×6回。

OHSでの測光観測の結果を、ハワイ大グループの観測結果 (Cowie et al.) と共に図5-33に示す。図中の実線と点線は以下の2つのモデルを示したものである。

model A: スターバースト銀河

質量 $3 \times 10^{11} M_{\odot}$

年齢 0.1 Gyr (0.1 Gyr の間、爆発的に星生成 (starburst) が起こる)

$z = 2.354$

減光 $A_v = 1$ 等 (天体近くの z での値)

model B: クエーサー

$z = 2.354$

光度 $L = 2 \times 10^{12} L_{\odot}$ ($M_B = 25.2$ 等)

減光 $A_v = 1$ 等 (天体近くの z での値)

可視光での分光観測では、クエーサーに見られる強い輝線が全く検出されていないため (ただし、ごく一部の特殊なクエーサーには輝線よりも吸収線が強いものも存在し、これらは Broad absorption line quasars と呼ばれている)、スターバースト銀河である可能性が高いが、測光観測全体の結果ではむしろクエーサーに近いものである。OHSでの分光観測は、この天体がこの2つのモデルのどちらに近いスペクトルを持つかを調べる上で非常に重要な役割を果たすが、残念ながら S/N が不足しており (図5-34) この結果で明確な結論を出すことはできない。しかし、若い銀河の特徴であるバルマー吸収が検出できなかったことから、クエーサーである可能性は高い。この天体に関しては、今後のOHSでの観測でもう一度観測し、バルマー吸収部分の連続スペクトル形状を調べる予定である。

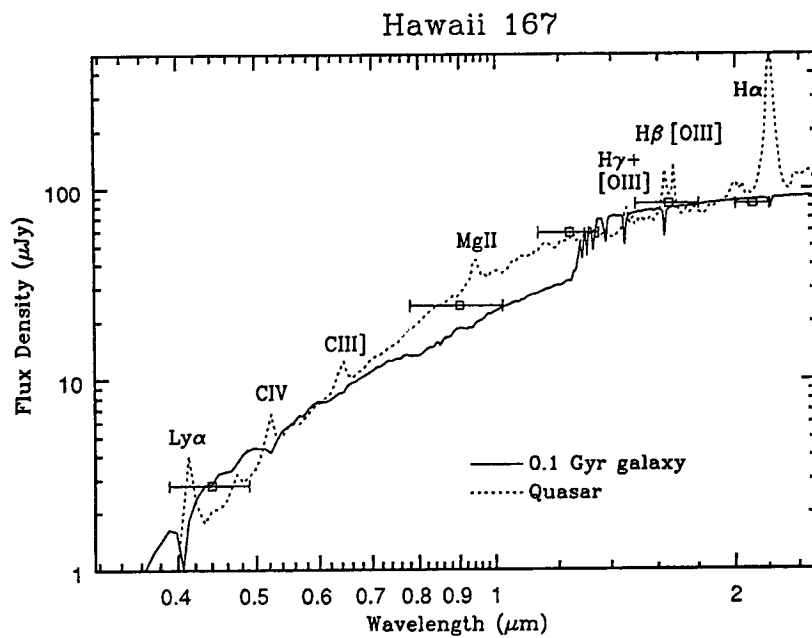


図5-33 Hawaii 167
測光観測結果

B ($0.44 \mu\text{m}$)・I ($0.90 \mu\text{m}$)
K' ($2.10 \mu\text{m}$)の測光値は
Cowie et al. による。測光観測全体では、
銀河よりはクエーサーに近い(ただし、
 $\text{Ly}\alpha \sim \text{Mg II}$ は吸収線として検
出されている)。

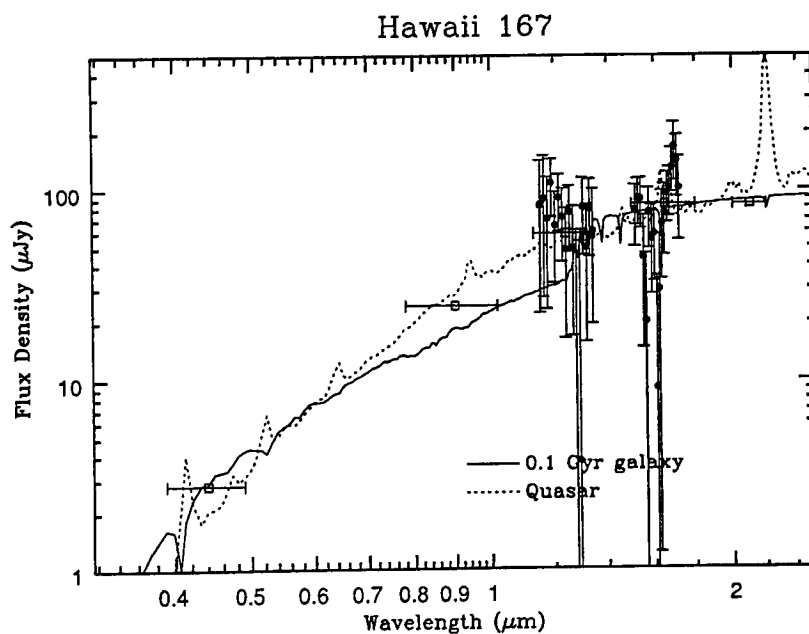


図5-34

OHSでの分光観測結果
S/Nが不足しており、
2つのモデルの違いを明
確にする事はできない。

OHSは、 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ での連続スペクトルの形状を調べ、他波長での観測結果と総合して天体の性質を調べる装置である。特に赤方偏移が $2 < z < 4$ の天体では、静止波長(天体の位置での波長)での可視光B・Vバンドでの観測に相当し、近傍の天体との比較や、銀河年齢の判断などをする上で重要な観測を行なう。現在の装置は、すばる8m望遠鏡に取り付けるためのプロトタイプ装置であり、解決すべき問題も依然残されているものの、H等級で18等という暗い天体の分光観測も行なうことができる能力を示した。最終章では、現在計画中のすばるOHSの光学設計結果と、銀河観測シミュレーション(この章でも用いた銀河モデル)による銀河年齢の判定可能性についての考察を行なう。

第 6 章

6 将来計画～「すばる」8 m望遠鏡用OHS

6-1 基本設計と目標性能

この章では、現在日本がハワイ島マウナケア山頂に建設中の「すばる」8 m望遠鏡の紹介と、すばる望遠鏡に取り付けるための大型OHSの光学設計結果、装置の性能予測を行なう。

6-1-1. すばる望遠鏡

北半球で最も天体観測に適しているハワイ島マウナケア山頂（海拔4200 m）には、現在、建設予定のものも含めて、4つの口径8 m以上の大型望遠鏡計画が進められている。その内の一つに、国立天文台が進めているすばる望遠鏡がある。この望遠鏡は、図6-2で示されているように、主焦点・カセグレイン焦点・ナスミス焦点（2つ）・クーデ焦点（2つ）の合計6つの焦点を持つ、口径8.2 mのリッチークレチエン式（主鏡：放物面、副鏡：双曲面のカセグレイン式望遠鏡よりも、明るいF比で広い視野を得るために、主鏡：放物面にほぼ近い双曲面、副鏡：双曲面とした望遠鏡、現在の大型望遠鏡は全てリッチークレチエン式である）反射望遠鏡である。望遠鏡を支える架台は、巨大望遠鏡を支えるのに適した経緯台式（図6-1）で、地表に対して垂直な回転軸と、その上に据えられた地表に平行な回転軸、焦点面での視野回転を打ち消すインストゥルメントローテータ（装置回転機構）またはイメージローテータ（視野回転鏡）によって、目標の天体を追尾する。

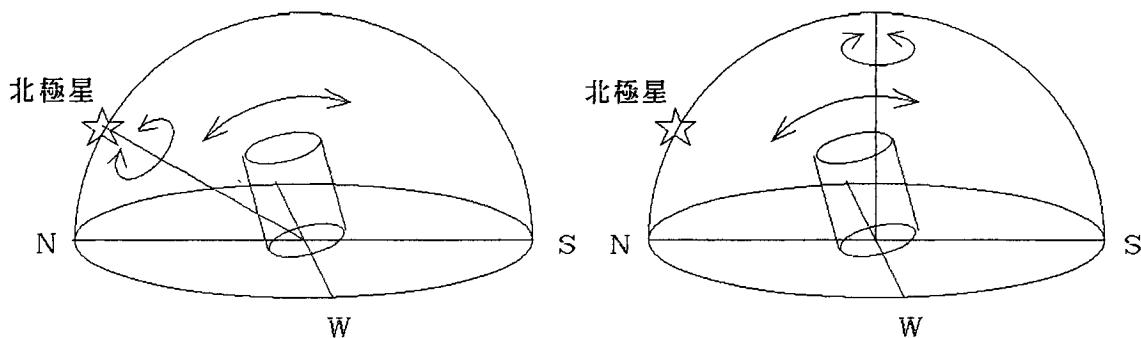


図6-1 赤道儀式と経緯台式

赤道儀式は、一つの軸の回転だけで天体の追尾ができ、像の回転も起こらないが、軸が傾いているため、重い重量を支えるのには不向きである。

経緯台式は、重い重量を支えるのには向いているが、追尾中に像が回転すること、天頂が特異点になることが欠点である。

経緯台式の場合、ナスミス焦点は水平のままゆっくりと回転するので、カセグレイン焦点に取り付けられない大型の装置を取り付けるのに適している。すばる望遠鏡の場合、OHSはこの焦点に取り付けることになる。すばる望遠鏡の最大の特徴は、8.2 mという巨

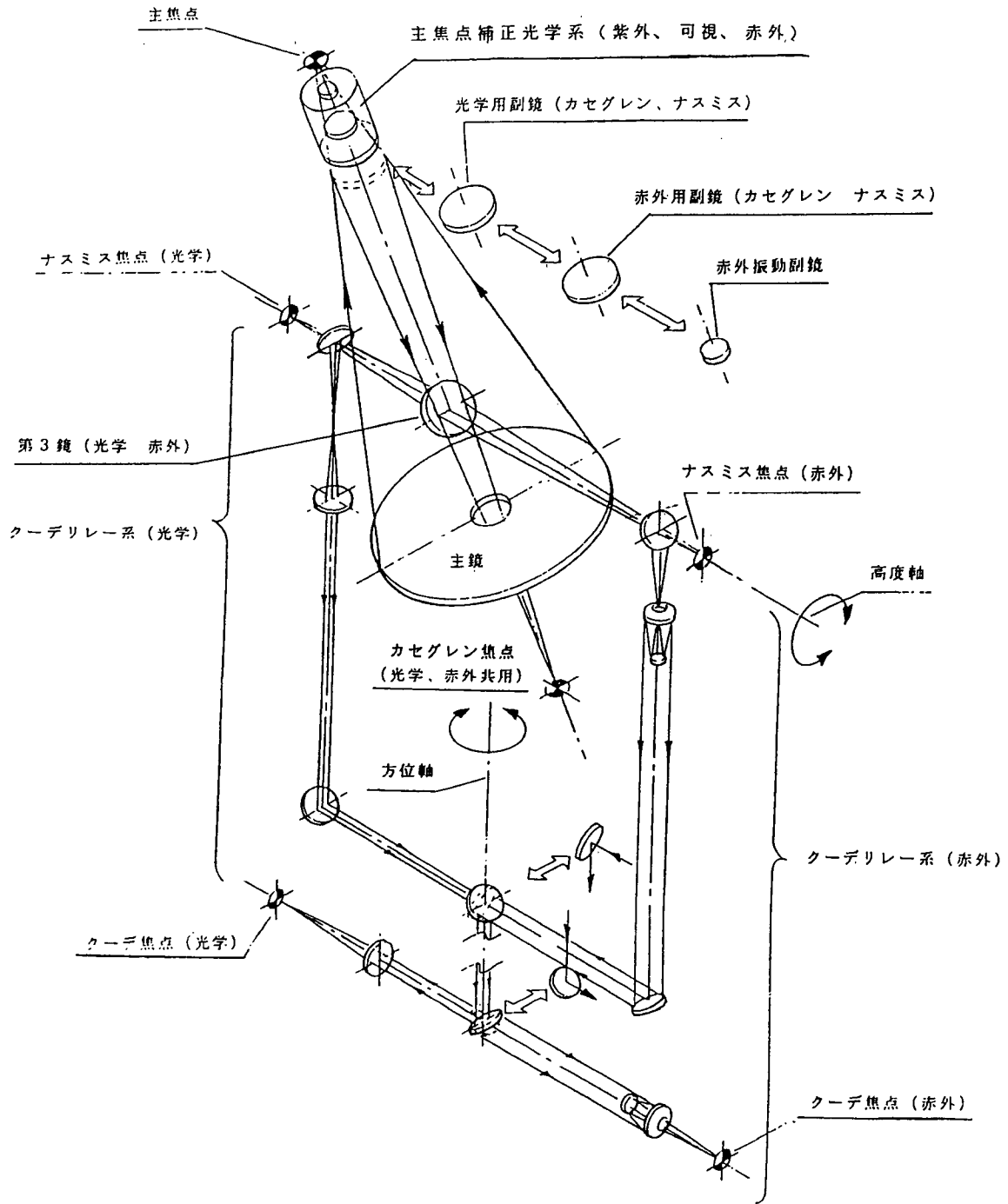


図6-2 すばる望遠鏡の焦点 (「すばる光学系と観測装置」より)

大な口径（主鏡直径は8.3m）にも関わらず、厚さ約20cmの薄い鏡を用い、背面から多数のアクチュエータで各点にかかる圧力を調整し、鏡面の形状を正確に保つ保持機構である。鏡面の形状は、図6-3の様なマイクロレンズアレイを用いることによって、常時モニタし（マイクロレンズアレイを用いることによって、主鏡はたくさんの小望遠鏡の集合体と同等になり、一つ一つの小望遠鏡の向き、すなわち局所的な主鏡の面の向きによって、マイクロレンズアレイによってつくられるたくさんの星像の位置が変化するため、主鏡の形状が検査できる）、アクチュエータ部分での圧力分布をコントロールするのである。また、もう一つの大きな特徴は、他の8mクラスの望遠鏡には無い、主焦点光学系を持つことである。主焦点は、非常に広視野を一度に観測できるため、広い領域をサーベイするのに最も適した焦点である。

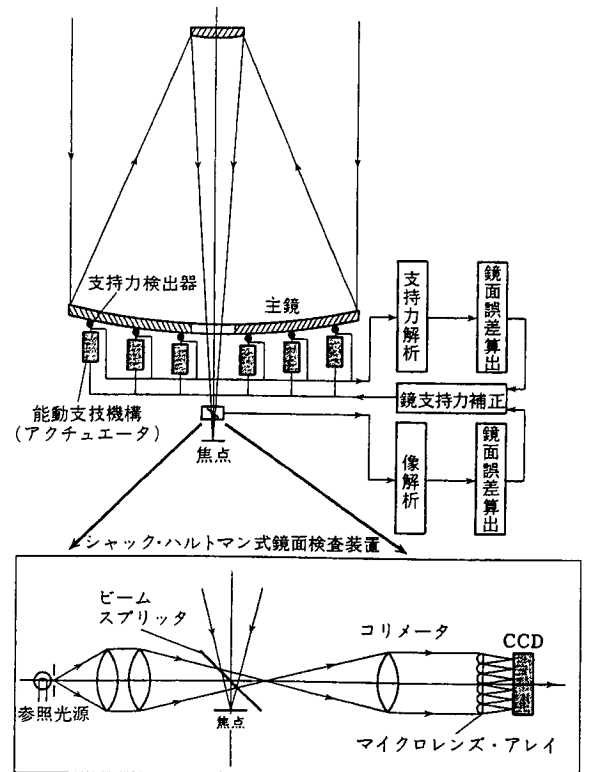


図6-3 すばる望遠鏡の主鏡保持機構 (家政則著「銀河が語る宇宙の進化」より)

すばる望遠鏡は、1998年の試験観測に向けて現在建設中である。

6-1-2. すばる望遠鏡用大型OHS

すばる望遠鏡は口径8.2mで集光力が大きいため、非常に暗い天体の観測も可能となる。しかし、ナスミス焦点は $F/12.6$ と明るいため（現在のOHSの入射光は $F/31$ ）、設計は困難なものとなる。すばる望遠鏡ナスミス焦点での望遠鏡の焦点距離は、 $820 \times 12.6 = 10332\text{cm}$ で、 1mm は

$$\begin{aligned}
 0.1 / 10332 \text{ rad} &= 180 / \pi / 103320 \text{ deg} \\
 &= 3600 \times 180 / \pi / 103320 \text{ arcsec} \\
 &= 2.0 \text{ arcsec}
 \end{aligned}$$

となる。マウナケア山頂での seeing（大気の揺らぎによる星像の広がり）は約 0.7arcsec なので、スリット幅は 1arcsec 程度は必要である。その場合、スリット幅は 0.5mm となり（現在のOHSのスリットと同じ幅）、式(2-2-1.a)よりスリット・コリメータ間の距離を 2m にすれば、現在のOHSと同じく波長分解能を 5500 にする事ができる。しかし、このときの光束直径は、 $200 / 12.6 = 15.8\text{cm}$ となり、球面カメラミラーで集光する際の球面収差が非常に大きいものとなるため、高い波長分解能を維持することができない。また、カメラミラーからマスクミラーへ集光する際の斜め上への反射角を大きくしなければならぬため、コマ・非点収差などの他の収差も増大する。これらの

問題を解決するため、すばる用のOHSでは

- ① コリメータをカメラミラーと同軸の双曲面鏡にし、カメラミラーでの球面収差を減らす。
- ② カメラミラーを大型化し、グレーティングから遠ざけることによって、マスクミラーへの反射角を小さくする。

この2点を改善することによって、マスクミラー上での収差を抑えることができ、OHSの設計が可能となった。図6-4に、すばるOHSの光学設計図を示す。入射スリットは、コリメータとカメラミラーを同軸にしなければならない都合上、2つのグレーティングの中間に設定しなければならない。かなり込み入った構造になる。カメラミラーはミラー自身の直径が1.3mを超えると製作が難しくなるため、曲率半径は4mとなった。また、すばるOHSでは、分光時の熱輻射を小さくするため、最終部に冷却カメラ/分光器を置き、OHS本体は光学的に完全に対称な構造をとることにした。その場合、OHSの最終結像面は入射スリット位置と完全に一致してしまうが、その直前に光束が分離する部分が少ないだけあるため、その部分に平面鏡を置くことにより光を赤外線カメラに導く。すばるOH

No. 記号

- 0 SL 入射スリット (10mm×可変、0.5mm×可変、閉、の選択が可能)
- 1 CL コリメータ (直角双曲面鏡、曲率半径4m、42cmφの半分、幅18cm)
- 2 G1 グレーティング (ブレード波長 5.0000 μm ブレード角 37°、23×17cm)
- 3 CM カメラミラー (球面鏡、曲率半径4m、130cmφ、幅50cm)
- 4 MM マスクミラー (凸球面鏡、曲率半径2m、54cmφ、幅3cm)
- 5 CM カメラミラー (No.3 と同一の鏡)
- 6 G2 グレーティング (No.2 と同じ仕様のもの)
- 7 RM リフォーカスミラー (No.1 と同じ仕様のもの)
- 8 PM 平面鏡 (7×4cm)
- 9 結像面

No.	ox (cm)	oy (cm)	oz (cm)	ot (deg)	op (deg)	oq (deg)	c (cm ⁻¹)	s
0	0.0000	0.0000	0.0000	-3.4398	0.0000	0.0000		
1	0.0000	0.0000	200.0000	0.0000	180.0000	0.0000	2.5000e-3	-1.0000
2	0.0000	12.0000	0.0000	0.0000	43.8893	180.0000		
3	96.7688	0.0000	388.1183	0.0000	194.0000	0.0000	2.5000e-3	1.0000
4	48.3947	0.0025	194.1004	0.0000	14.0000	0.0000	-5.0000e-3	1.0000
5	96.7688	0.0000	388.1183	0.0000	194.0000	0.0000	2.5000e-3	1.0000
6	0.0000	-12.0000	0.0000	0.0000	43.8893	180.0000		
7	0.0000	0.0000	200.0000	0.0000	180.0000	0.0000	2.5000e-3	-1.0000
8	0.0000	-1.9895	33.0000	3.4413	-45.0000	0.0000		
9	-33.0421	-1.9895	33.0000	0.0000	90.0000	3.4385		

表6-1 すばるOHSの光学パラメータ

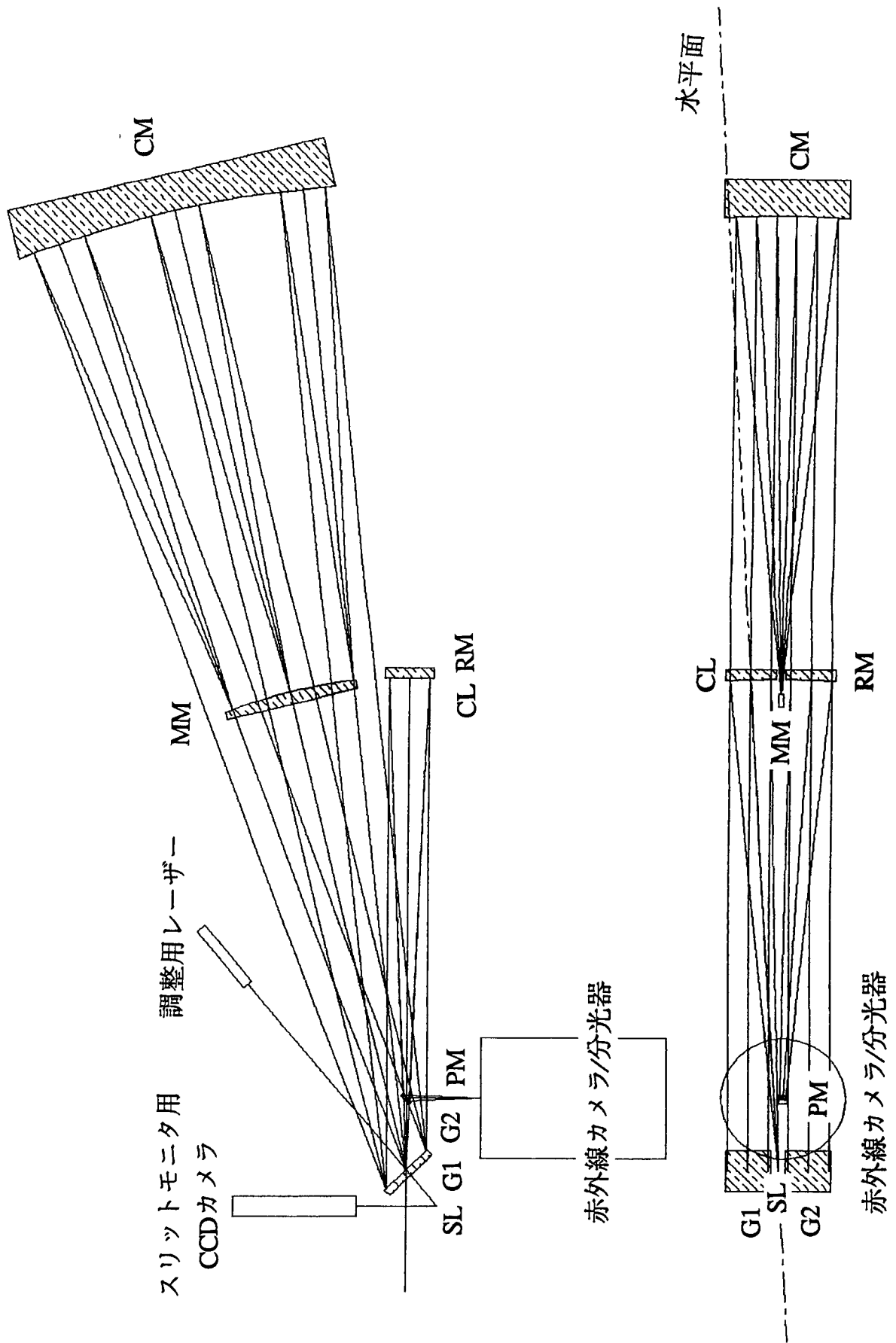


図 6 - 4 すばる OHS の光学設計図

Sには「分光器」としての役割はなく、「夜光除去装置」としての完全な前置光学系となっており、分光観測は、その後の独立した赤外カメラ／分光器によって行なわれるのである。図6-5・6-6に、夜光マスク上・OHS最終像面での結像の状態を示す。マスク上での球面収差は高次のものまで除かれていないので、最終的な像にはその影響が残り、約60 μm のやや広がった像となるが、角度に直すと約0.12 arcsecとなり、これは大気の揺らぎによる像の広がり（約0.7 arcsec）に対してかなり小さいので、この大きさのボケは観測にはあまり影響が無いものと判断した。

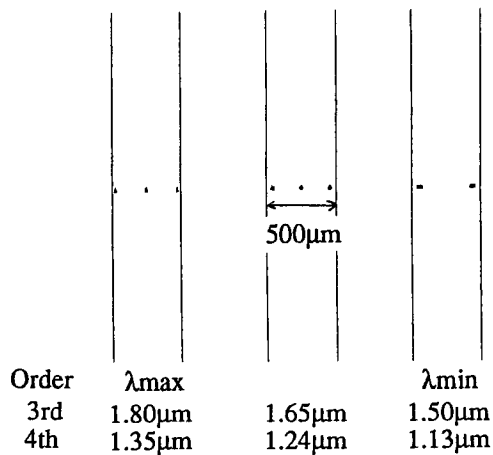
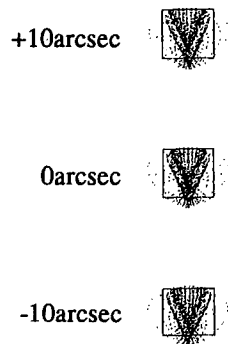


図6-5 マスクミラー上での像
スリット中央部3点より入射した光の、マスクミラー上での結像の様子。縦線の間隔は500 μm で、スリット像の幅に相当する。スリットの長さ方向では像の大きさはほとんど変化しない。グレーティングの3次がHバンド、4次がJバンドの光である。



1.50-1.80 μm

図6-6 OHS結像面での像
スリット両端及び中央からの光のOHS結像面（赤外線カメラ入射面）での結像の様子。正方形の一辺は60 μm の大きさである。

すばるOHSの機械設計はまだ行なわれていないが、すばる望遠鏡での観測は、観測室と装置の場所が離れているため、観測中必要な作業は全て遠隔操作により行なわれなくてはならないため、モーターによる駆動部分が多くなることが考えられる。現在のOHSでの状況を考え、すばるOHSの可動部分は以下の部分を予定している。

No. 記号

- 0 SL スリット両側と、長さ調節のための背面板の計3カ所（モーター）
- 1 CL 前後の位置 $\pm 10\text{mm}$ の移動と、あおり・回転の微動の計3カ所（モーター）
- 2 G1 十字カバー開閉（モーター）と、あおり・回転・ねじりの微動の3カ所（手動）

- 3 CM あおり・回転・前後の微動の計3カ所（手動調整の後、完全に固定できること）
- 4 MM 前後の位置±10mmの移動（モーター）と、あおり・回転の微動2カ所（手動）
- 6 G2 あおり・回転・ねじりの微動の計3カ所（手動）
- 7 RM 前後の移動は No.1 と連動の他、あおり・回転の微動の2カ所（モーター）
- 8 PM あおり・回転の微動（モーター）
- 9 赤外線カメラ／分光器 装置全体の前後移動+20mm, -80mm（モーター）
装置全体の微小ねじり、上下・左右調整±10mm（手動）

すばるOHSの主な仕様は以下の通り。

設置場所	赤外用ナスミス台
大きさ	4m×3m
重量	2000kg
入射F	F/12.6
視野	1"×20"（0.5mm×10mmスリット使用の場合）
使用波長域	Jバンド 1. 125μm～1.350μm（4次） Hバンド 1. 500μm～1.800μm（3次）
出射F	F/12.6
結像性能	スリット再生像全面で、約60μm（0.123"）
夜光除去率	1/30～1/50（夜光マスク上での波長分解能5500）
光透過効率	0.43（光学面数 8）
S/N	3.6～4.6倍
限界等級	+1.4等以上

光透過率は、2つのグレーティングの効率がそれぞれ0.8、残りの6面の反射率がそれぞれ0.97、夜光マスクの開口率が0.8として計算している。OHSを用いることによるS/Nの増加分は、夜光除去率によっても変わるが、天体からの信号が0.43倍になるのに対して、背景光は0.43/30倍（ノイズは $\sqrt{0.43/30}$ 倍）になるため、 $0.43/\sqrt{0.43/30}=3.6$ 倍以上になることが予想される。

すばるOHSには、専用の赤外線カメラ／分光器が必要である。この装置は、内部にコリメートされた光線を持ち、グリズムを用いての分光観測も可能な設計になっている。OHSのカメラ部としての役割を果たすと共に、カセグレイン焦点に取り付けて単独の観測も行なうことも考えて、JHK3バンドで使用できることを目標に現在設計を進めている。目標とする装置仕様は以下のようにになっている。

大きさ	40cmφ×100cm（光学系部分 10cmφ×80cm）
重量	150kg
入射F	F/12.6（カセグレイン焦点で使用の場合F/12.2）
視野	最大2 arcmin×2 arcmin（6cm×6cm）
使用波長域	JHKバンド 1. 05μm～2.45μm

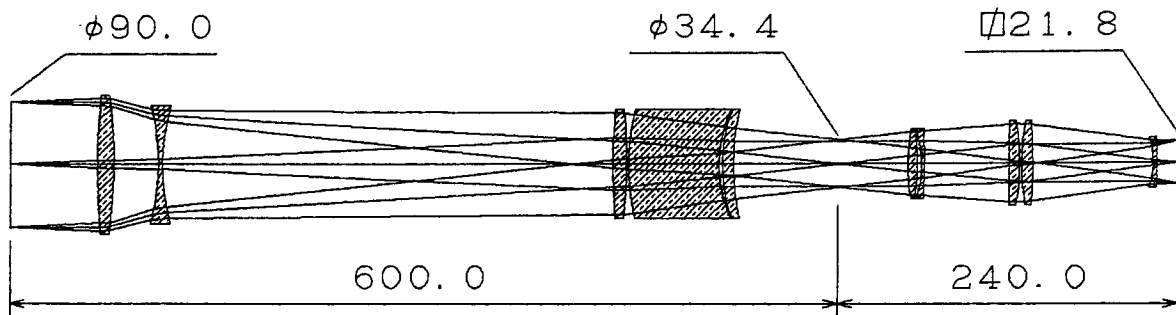


図6-7 すばるOHS用赤外カメラ/分光器の光学設計図

光学設計は自作の光路追跡プログラムにより進めている。設計はまだ完全ではないが、最終的にはほぼこの様な形態になるものと考えられる。中央右寄りの光線が平行になる部分にグリズムを入れ、分光観測を行なう。

光学系は3:1縮小光学系で、入射窓・フィールドレンズ(2枚)・コリメータ部(3枚)・フィルター・カメラレンズ(3枚)・視野平坦化レンズ(2枚)から成る。フィルターはJ・H・Kバンドパスフィルター、OHS用の1~2 μ mフィルターと、数種の狭帯域・広帯域フィルターを持ち、グリズムは縦方向に緩やかに分散のかかるものを数種と、横方向に高い分散のかかるものを数種備え、それぞれ単独でlong slitでの低分散・中分散分光観測ができ、また、両方を同時に用いると2次元に分散のかかった広帯域中分散分光観測が可能である。スリットは遠隔操作により上下・左右共に幅が自由に選択でき、使用するグリズムによりスリットの方向を決定する。

最終F	F/4.2 (カセグレイン焦点で使用の場合F/4.1)
検出器	1024×1024 HgCdTe (1 pixel 19 μ m)
結像性能	検出器中央で20 μ m以下、周辺部で40 μ m程度
効率	0.2 (入射窓・レンズ10枚・フィルター・検出器)
空間分解能	最大0.12 arcsec (1 pixel)
波長分解能	最大600 (スリット幅1")

この装置を単独で用いた場合、積分時間1000 sec、効率0.16、S/N=10での限界等級(面輝度)は、表6-2の様になる。OHSを併せて用いた場合、Jバンドでは検出器の性能で限界等級が決まるので、検出器はできる限り暗電流の少ないものを用いる必要がある。また、OHSによる像のボケの大きさは60 μ mであるが、カメラ光学系で3:1に縮小することにより20 μ mとなり、カメラ自体の結像精度と一致し、検出器1素子の大きさに相当するため、OHSと併せて用いても、単独で観測した場合と同程度の空間分解能が維持できるものと思われる。

	J	H	K
カメラモード	22.5	21.0	20.4
分光器モード	20.7	19.4	18.8
上段 R=100	20.0	18.8	18.2
中段 R=300			
下段 R=600	19.5	18.4	17.8

表6-2 すばるOHS用赤外カメラ／分光器単独での性能
全積分時間1000秒、 $S/N=10$ での検出限界（面輝度）で表の単位は $\text{mag}/\text{arcsec}^2$ で、Jバンドの分光では検出素子の暗電流（0.1 electron/s）がやや問題となり、OHSを併せて用いた場合、Hバンドでは1.4等以上検出限界は上がるが、Jバンドでは検出器の性能に依存する。

6-2. 原始銀河観測シミュレーション

OHSが最も得意とする観測は、非常に暗い遠方の天体のスペクトルの連続波成分を観測することである。天体スペクトルの輝線成分は、波長分解能を上げることにより背景光を弱めて（薄めて）、天体からの輝線を S/N 良く観測することができるが、連続光成分を観測するためには、高い波長分解能では天体からの光も薄まってしまうために観測しにくくなる。しかし、低い波長分解能では背景光も強くなってしまうために、一般的には非常に暗い天体からの連続スペクトル成分を明るい背景光の中で観測することは、巨大望遠鏡といえども困難なことになる。また、赤方偏移が大きい遠方の天体の場合、 $H\alpha$ (6563 Å)・ $H\beta$ (4861 Å)・ $OIII$ (5007 Å)等の可視光の強い輝線が近赤外で観測されるため、フィルターを用いての広帯域測光ではそれらの輝線の影響により、正確な連続スペクトル強度を決定することはできない（図6-8）。OHSは連続スペクトルを観測する際

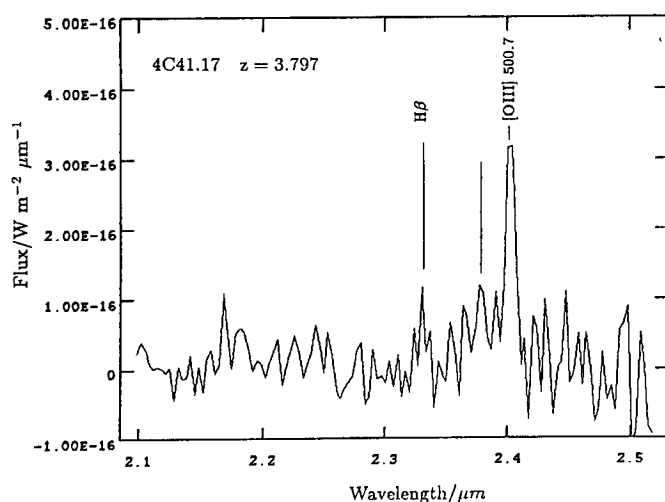


図6-8 現在観測されている最も遠い銀河4C41.17のKバンドでのスペクトル（Eales and Rawlings 1993）

この天体は、Kバンドでの広帯域測光観測の結果から、非常に赤い（赤外での連続光が強い）天体と考えられていたが、Kバンドでの明るさのほとんどは輝線成分であることが判明し、天体の「赤さ」は不定性を大きく含むものとなった。

最も問題となる背景光を根本的に減らしてしまうため、観測することが難しい連続スペクトル成分の強度を精度良く観測することができる装置である。

天体からの輝線を観測することは、天体中のガス成分を観測していることに相当し、同

一元素からの輝線の強度比や禁制線（遷移確率が非常に低い順位間での輝線放射）の強度等からガスの温度や密度が、輝線幅からガスの運動の様子が判る。一方、天体からの連続スペクトルを観測することは、クエーサー等のAGN（活動的銀河核：巨大ブラックホールを中心核に持つ重力エネルギーシステムと考えられているものの総称）周辺のプラズマ雲からの非熱的放射、銀河中の星からの連続スペクトル、ダストやガス円盤からの黒体放射等を観測することに相当し、これらの輝線／連続スペクトルは、多くの場合銀河円盤等に存在するダストにより赤化（短波長の光ほどダストの影響を受け弱められる）を受けている。

AGNからの非熱的放射は、プラズマ中の電子のエネルギースペクトルを反映しており、電子のエネルギーが高くなるにつれ、クーロン散乱・制動放射・シンクロトロン放射と逆コンプトン効果と、異なる原因によって連続スペクトルが放射されるが、これらの非熱的放射は、全て振動数（または波長）のべき乗に比例する連続スペクトルを持つ。すなわち、単位振動数あたりの放射エネルギー $f \nu$ は振動数 ν に対し $f \nu \propto \nu^\alpha$ の関係がある。指数 α は spectral index と呼ばれ、電波領域では大多数のクエーサーや電波銀河において $-1.2 < \alpha < -0.6$ であることが観測によって判明している。これらの天体からの可視・赤外スペクトルは、非熱的放射（主にシンクロトロン放射）の他に黒体放射や周辺の星のスペクトルが加わり、それらの寄与によって連続スペクトルの形状は変化する。典型的なクエーサーの可視光でのスペクトル（図6-9）は、非熱的放射（ $\alpha \sim -1$ ）と中心核

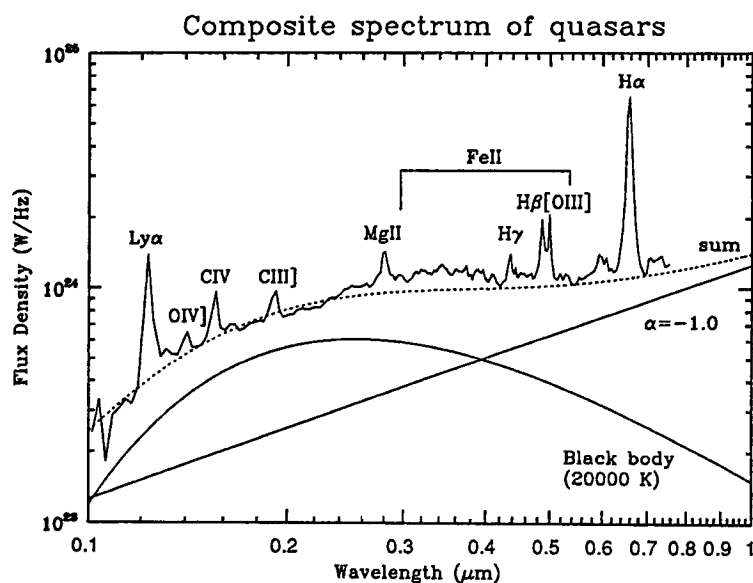


図6-9 近傍のクエーサーの合成スペクトル (Cristiani and Vio 1990)
標準的な明るさ ($M_B = -25.9$ 等) のもの

周辺のガス円盤からの20000～30000 K黒体放射 (big blue bump)、及び中心核近傍または外側のガスからの強い輝線放射の重ね合わせによって表されており、5500 Å付近での傾きは big blue bump の影響により $\alpha \sim -0.5$ となっている。

通常の銀河からの連続スペクトルは、ほとんどが星からの光によるものである（中には中心核にAGNを持ち非熱的成分の強いものや、ダストにおおわれ1000 K程度の低温

度黒体輻射成分の強いものもあるが)。星の光は単なる黒体輻射と異なり、恒星表面に存在する恒星大気での吸収が、特に可視光領域に於て強く現われ、連続スペクトルの形は星の種類によって大きく異なる。また、銀河に含まれる星の種類比率は、星の寿命の違いにより刻々と変化していく。銀河全体での連続スペクトルは、たくさんの星のスペクトルの重ね合わせによってつくられており、星の生成率や寿命などから銀河中に含まれる様々なタイプの星の数を計算することにより、計算することができる。逆に言えば、銀河の連続スペクトルの形から銀河中に含まれる星の割合を推定し、銀河の年齢に関する情報を得ることができるのである。この章では、銀河のスペクトルをシミュレーションにより合成し、すばるOHSで銀河の進化をとらえることができるか検討する。

6-2-1. 銀河モデル

銀河は、中心の星が密集した部分（バルジ）と円盤部（ディスク）、それらを包むように球状に分布するガス（ハロー）から成る。現在の我々の銀河では、バルジ部分にはガスがほとんどないため星生成はあまり起こっておらず（すなわち古い星が多い）、現在の星生成は主にディスク部分で起こっている。しかし近年、バルジ中の比較的古い星には、重元素が太陽での割合よりも多量に存在していることが明らかとなり（Rich 1990）、過去にバルジでは大規模な星生成が起こって短い期間に非常に大量の重元素がつくられ、同時に、頻繁に発生した超新星爆発によってバルジ中のガスが加熱されて散逸し、現在のバルジがつくられた（Arimoto et al. 1992）と考えられるようになった。ここで取り上げる銀河モデルは、初期の短い期間に爆発的星生成（starburst）が起こり、その後、それぞれの星の寿命と緩やかな星生成により、星の割合が変化し銀河全体のスペクトルが変化していく様子を、大まかな計算によりシミュレートするものである。

銀河モデルを実際に作るには、

- ①ある年齢の銀河での星の生成率（ $S(t)$ ）
- ②生まれた星の質量分布（ $I(m)$ ）
- ③主系列星の質量と温度（ $T(m)$ ）・半径（ $R(m)$ ）・寿命（ $\tau(m)$ ）の関係
- ④温度・星の表面での重力・重元素量と恒星大気のスペクトル（ $f_{\text{star}}(T, g, Z, \lambda)$ ）の関係
- ⑤星間減光の大きさ（ $A(\lambda)$ ）
- ⑥超巨星・赤色巨星（AGB star）の質量と温度（ $T_g(m)$ ）・半径（ $R_g(m)$ ）・寿命（ $\tau_g(m)$ ）の関係等が必要となる。以下順を追って解説する。

定数及び単位：光速	$c = 2.998 \times 10^{10}$ cm/s
太陽質量	$1 M_{\odot} = 1.989 \times 10^{33}$ g
太陽半径	$1 R_{\odot} = 6.960 \times 10^{10}$ cm
パーセク	$1 \text{ pc} = 3.086 \times 10^{18}$ cm

①：星の生成率（Star Formation Rate: SFR）とガスの量の時間変化
 銀河は、小さいもので $10^8 M_{\odot}$ 、大きいもので $10^{13} M_{\odot}$ の質量を持つ。このモデルで

は含まれる星の数、最終的な銀河の明るさ等は全て銀河全体の質量に比例するため、質量は特定せず M_{gal} であると考えていく。また、進化した楕円銀河では、ほとんどの物質が星になっていると考えられているが、このモデルでは銀河の全質量 M_{gal} の 8 割が最終的に星になり、残りの 2 割はガスのまま変化しないと考えている。即ち、星の原料となる初期状態でのガスの量 $M_{gas}(0)$ は

$$M_{gas}(0) = M_{gal} \times 0.8$$

と表される。

星の生成率に関しては詳しいことはほとんど判っていないが、ここでは初めの 10^8 年間で爆発的に星が生成し、その後一定の割合で増え続けるとした。星生成率は通常、一年あたりに生成される星の質量 (M_{\odot}/yr) で表されるが、ここでは一年あたりに生成される星の、原料となるガスの質量 (M_{gas}) 全体に対する割合で定義した。

$$S(t) = \begin{cases} 1 \times 10^{-8} / yr & (0 \leq t \leq 10^8 \text{ yr}) \\ 5 \times 10^{-10} / yr & (10^8 < t \text{ yr}) \end{cases}$$

これにより年齢 t yr の銀河の星の生成速度 (ガスの減少速度) は次のように表される

$$dM_{gas}(t) / dt = -S(t) \cdot M_{gas}(t)$$

これより

$$M_{gas}(t) = M_{gas}(0) \cdot \exp\left(-\int_0^t S(t) dt\right)$$

と表されるが、ここではまだ死滅する星から戻されるガスについては考えられていない。図 6-10 に $M_{gas}(t) / M_{gal}$ の時間変化を表す。原料となるガスは、始めの星生成でほとんどが消費され、その後は緩やかな星生成により最終的に全体のガスの 8 割を消費する。

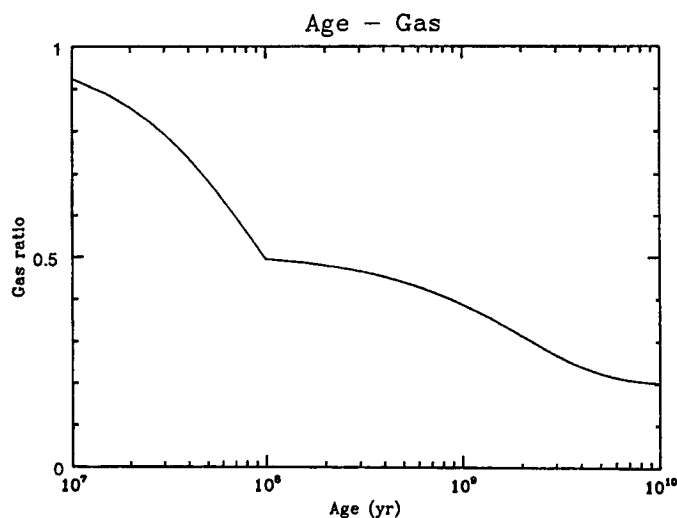


図 6-10 原料となるガスの量の時間変化
横軸は年齢 (yr) 縦軸はガス比率 ($M_{gas} / M_{gal} + 0.2$)。このモデルでは、始めの星生成でほとんどのガスが消費される。

②: 生成される星の質量分布 (Initial Mass Function: IMF)

生成される星の質量 m と数密度 $N(m)$ の関係 (初期質量関数) は、太陽近傍の星の質量分布を調べることにより、 $N(m) \propto m^{-2.35}$ の関係が得られている (Salpeter 1955) が、ここでは、数密度のかわりに質量分配比 $I(m) \propto m N(m)$ を用いて考えていく。また、 $1 M_{\odot}$ (太陽質量) より軽い星や $10 M_{\odot}$ より重い星は $m^{-2.35}$ で与えられる関係よりも少なくなる傾向があり (Scalo 1986)、このモデルでは通常以下の値を採用している。

$$I(m) \propto m^{\gamma} \quad \gamma = \begin{cases} -0.3 & (0.1 M_{\odot} \leq m \leq 1 M_{\odot}) \\ -1.3 & (1 M_{\odot} \leq m \leq 10 M_{\odot}) \\ -2.3 & (10 M_{\odot} \leq m \leq 100 M_{\odot}) \end{cases}$$

規格化条件 $\int_{0.1}^{100} I(m) dm = 1$

ここでは、 $0.1 \sim 100 M_{\odot}$ の星しか顧慮していないが、これより軽い星の光は非常に弱く、全体のスペクトルにほとんど影響を与えないことと、これより重い星は現在の宇宙ではまず存在しないこと (昔の宇宙では存在したかもしれないが) から、この範囲の質量の星のみを考えれば十分であると判断した。また、 γ の値は他にも様々な説があり、必ずしも太陽近傍の星が、銀河全体で生成される星の割合を正しく反映しているとは限らないので、場合によっては γ の値を変えて考えることもある。

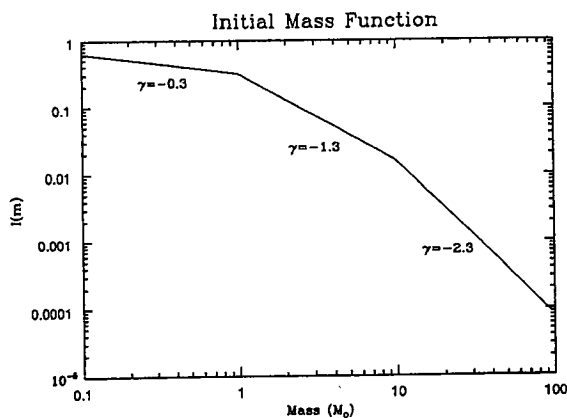


図 6-11 質量分配比 I と質量 m の関係
横軸は質量 (M_{\odot}) 縦軸は分配比率。

③: 主系列星の質量と温度 ($T(m)$) ・半径 ($R(m)$) ・寿命 ($\tau(m)$) の関係 $T(m)$, $R(m)$ は表 6-3 で与えられているものを用いた。

主系列星として存在する期間 τ yr は次の式で与えられる。(log は常用対数)

$$\log(\tau(m)) = 10.02 - 3.57 \log(m) + 0.9 (\log(m))^2$$

(Gehrz et al. 1983)

スペクトル型	質量 $\log(m)$	有効温度 $T(m)$	半径 $\log(R(m))$
M 5	- 0. 6 7	3 3 0 0	- 0. 5 0
M 0	- 0. 3 3	3 9 0 0	- 0. 2 0
K 5	- 0. 1 6	4 4 0 0	- 0. 1 3
K 0	- 0. 1 1	5 3 0 0	- 0. 0 7
G 5	- 0. 0 3	5 6 0 0	- 0. 0 3
G 0	0. 0 4	6 0 0 0	0. 0 2
F 5	0. 1 1	6 6 0 0	0. 0 8
F 0	0. 2 3	7 2 0 0	0. 1 3
A 5	0. 3 2	8 3 0 0	0. 2 4
A 0	0. 5 1	9 6 0 0	0. 4 0
B 5	0. 8 1	1 5 0 0 0	0. 5 8
B 0	1 2 5	2 9 0 0 0	0. 8 7
O 5	1 6 0	4 5 0 0 0	1. 2 5

表 6 - 3 主系列星の質量と、有効温度・半径の関係 (Allen 1973)
 質量の単位は M_{\odot} 、有効温度の単位は K、半径の単位は R_{\odot} である。

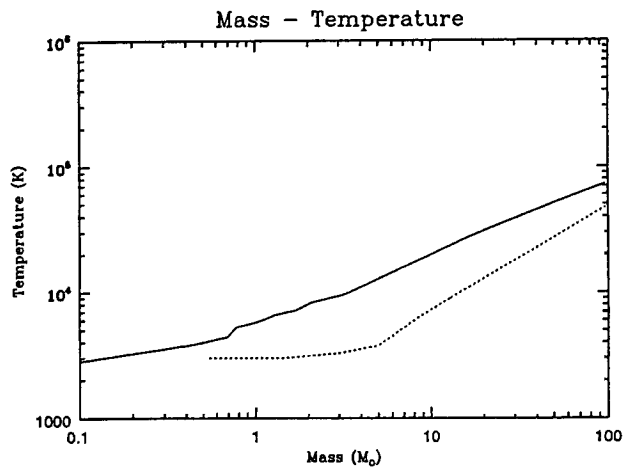


図 6 - 1 2 有効温度 T と質量 m の関係
 横軸は質量 (M_{\odot}) 縦軸は有効温度 (K)。
 点線は超巨星・赤色巨星の代表値を表す。

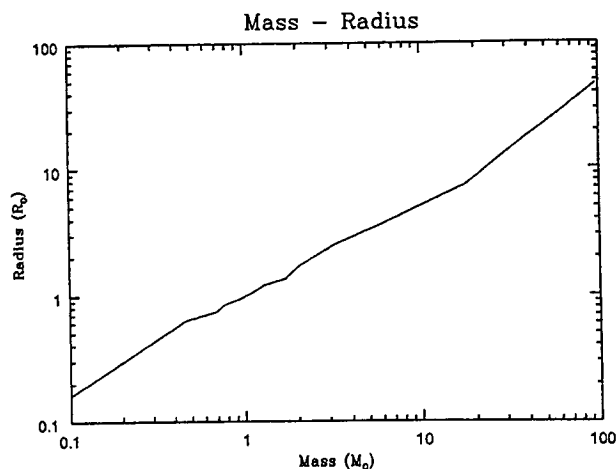


図 6 - 1 3 星の半径 R と質量 m の関係
 横軸は質量 (M_{\odot}) 縦軸は半径 (R_{\odot})。

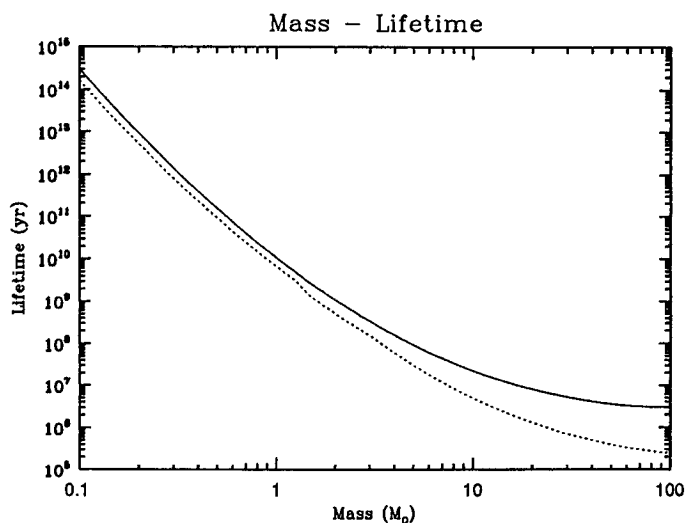


図6-14 星の寿命 τ (主系列星として存在する期間) と質量 m の関係
横軸は質量 (M_{\odot}) 縦軸は寿命 (yr)。
点線は超巨星・赤色巨星の代表値を表す。

④: 温度・星の表面での重力・重元素量と恒星大気のスเปクトル ($f_{\text{star}}(T, g, Z, \lambda)$) の関係

5500 K以上の有効温度の星は Kurucz の恒星大気モデル (Kurucz 1979) を用い、それより低い温度の星に関しては、黒体として扱った (両者は、5500 Kでほぼ同じスペクトルとなっている)。

$$f_{\text{star}}(T(m), g(m), Z, \lambda) = \begin{cases} \text{Kurucz の表} & (T(m) \geq 5500 \text{ K}) \\ \pi b(\lambda) & (T(m) < 5500 \text{ K}) \end{cases}$$

$$(W/cm^2/\mu m)$$

ただし $b(\lambda) = 11910 / \lambda^5 / (\exp(14387 / \lambda / T(m)) - 1)$
($W/cm^2/\mu m/Sr$)

恒星表面での重力は質量と半径より計算し、重元素量は基本的には太陽での存在量と同じとするが、場合によっては太陽での存在量の 1/10 の場合のデータも用いる。5500 K未満では、恒星表面での重力 g と重元素量 Z は顧慮されていない。星全体でのスペクトル S_{star} は f_{star} に星の表面積を掛けることによって得られる。

$$S_{\text{star}}(T(m), g(m), Z, \lambda) = f_{\text{star}} \cdot 4\pi (R(m) \cdot 1 R_{\odot})^2 \quad (W/\mu m)$$

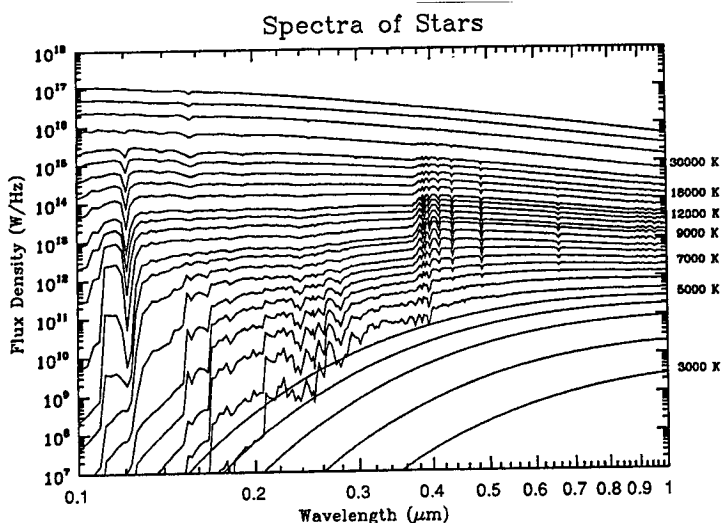


図6-15 様々な温度の星のスペクトル
横軸は波長 (μm) 縦軸は輻射強度 (W/Hz)。

これは、単位波長あたりの輻射強度を表しているが、 $c = \nu \lambda$ より $d\lambda = \lambda^2 / c \cdot d\nu$ の関係があるため、 $S_{\text{star}} \cdot 10^4 \cdot \lambda^2 / c$ は単位振動数あたりの輻射強度 (W/Hz) を表す。図6-15に単位波長あたりの輻射強度で表した様々な温度での星のスペクトルを表す。

⑤: 星間塵による減光

星間塵による減光の大きさは、等級にして何等増加するかという量で与えられ、これを $A(\lambda)$ と表す。これは星間塵の量に関係しているが、銀河全体の星間塵の量は水素ガスの量と関係していると考えられており、減光の大きさは水素ガスの量を用いて定められることになる。また、 $A(\lambda)$ は、我々の銀河・大マゼラン雲・小マゼラン雲での観測データ等より、 λ^{-1} に比例する成分と $0.22 \mu\text{m}$ 付近の超過成分からなることが判っており、更にこの超過成分は若い銀河ほど小さいと考えられている (図6-16)。よってこの銀河モデルでは、 λ^{-1} に比例する成分のみを考える事にした。

$$A(\lambda) \propto 1/\lambda$$

$$E(B-V) = N_H / (6 \times 10^{21})$$

(Prevot et al. 1984)

$$A(V) = 3 \times E(B-V)$$

(N_H (cm^{-2}): 水素原子ガスの視線密度 B: $0.44 \mu\text{m}$ V: $0.55 \mu\text{m}$)

銀河が生成された初期の段階では、水素ガスと星間塵の存在比率は現在よりもかなり低いものと思われる (大マゼラン雲の場合 $1/4$ 、小マゼラン雲の場合 $1/17$) ので、原始銀河を考える場合、上式で計算される我々の銀河での $A(V)$ の値に対し、 $0 \sim 1/4$ を掛けることにした。また、水素ガスの量は時間によって変化していく値であるが、水素ガスと星間塵の比率の不定性が非常に大きいため、ここでは銀河全体の質量の2割に相当するガスの量を星間塵に関係した水素ガスの量であるとした。また、銀河手前側表面の星は全く減光を受けず、奥の星になるほど減光を受けることになるため、平均的な減光の大きさを求める必要がある。銀河を直径 D_{gal} (kpc) の円盤とし、円盤に対して垂直な方向から観測するものとする、銀河を透かして見たときの減光の大きさ $A_{\text{th}}(\lambda)$ は、

$$A_{\text{th}}(\lambda) = N_H / (2 \times 10^{21}) \cdot \chi \cdot 0.55 / \lambda \quad (\chi = 0 \sim 1/4)$$

$$\text{ただし、} N_H = 0.2 \cdot M_{\text{gal}} \cdot 1 \text{ Mo} / \pi (D_{\text{gal}} \cdot 10^3 \text{ pc} / 2)^2 / M_{\text{p}} \quad (\text{cm}^{-2})$$

$$M_{\text{p}} = 1.673 \times 10^{-24} \quad (\text{g}) \quad (\text{陽子の質量})$$

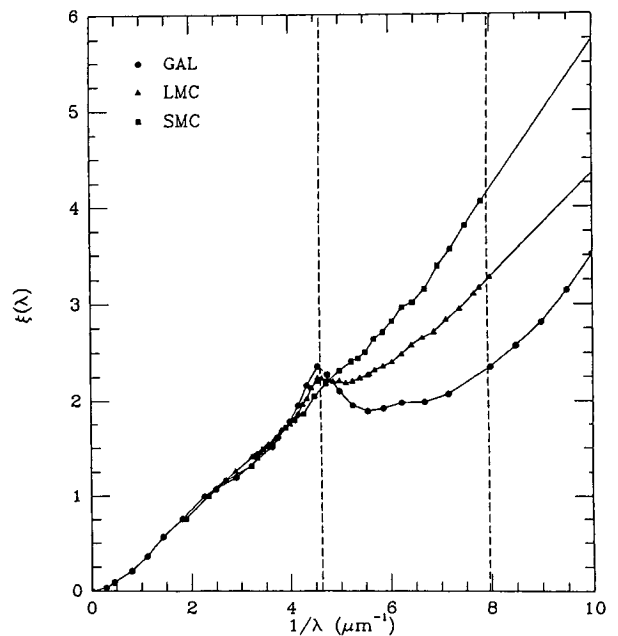


図6-16

星間塵による減光 (Pei et al. 1991)
横軸は (μm^{-1}) 縦軸は相対的な減光の大きさ。

銀河の厚さを1とした場合、 x の位置での減光は $A_{th} \cdot x$ となるため、これを実際の減光比率にして厚さ方向に積分すると、

$$\int_0^1 10^{(-A_{th} \cdot x / 2.5)} dx = (1 - 10^{(-A_{th} / 2.5)}) / (\ln(10) \cdot A_{th} / 2.5)$$

すなわち平均の減光は、 $A(\lambda) = -2.5 \log(\text{上式})$ で表される。

⑥：超巨星・赤色巨星 (AGB star) について

超巨星・赤色巨星は星が主系列星としての寿命を終えた後、進化してできる星であり、元の星の質量により、主系列星の寿命の15%以上に相当する寿命を持ち、非常に複雑な変化をする星である。絶対光度、半径などは常に細かく変化するので、すべての星に対して、その細かな変化を追っていく訳には行かない。そこで、この不安定な期間中、最も長く存在する部分の値で代表して取り扱う事にした。

質量 (m)	$\tau_g(m) / \tau(m)$	$\Delta \log(L(m))$	$\Delta \log(T(m))$
15.00	0.1586	0.5745	-0.4095
9.00	0.1913	0.3830	-0.4483
5.00	0.2639	0.3404	-0.5302
3.00	0.3333	0.2128	-0.4569
2.25	(0.3333)	0.6383	-0.4310
1.50	(0.3333)	1.0638	-0.3060
1.25	(0.3333)	1.2766	-0.2241
1.00	(0.3333)	1.6170	-0.1466

表6-4 超巨星・赤色巨星の寿命・光度・有効温度

$\tau_g(m)$ は寿命、 $\Delta \log(L(m))$ 、 $\Delta \log(T(m))$ は主系列星から超巨星・赤色巨星へ変化するときの、光度・温度の変化量の代表値である。

(τ_g はIben 1967を参考に算出。L、TはAllen 1973より。)

これらから次式により半径の変化量が計算される。

$$L(m) \propto T(m)^4 \cdot R(m)^2 \quad \text{より}$$

$$\Delta \log(R(m)) = (\Delta \log(L(m)) - 4 \Delta \log(T(m))) / 2$$

$$= \log(R_g(m)) - \log(R(m))$$

これから $R_g(m) / R(m)$ を計算すると、 m の値によらず、ほぼ1.2~1.5となるのでその平均値を取り、

$$R_g(m) = 13.3 R(m)$$

とすることにした。これらの星のスペクトルは、主系列星とはやや異なるが、簡素化のためここでは同じ温度の主系列星のスペクトルを用い、主系列星での計算と同様に表面積を掛けてSAGBとする。

これらの式より、以下の温度を持つ28種類の星について分布を調べ、銀河全体でのスペクトルを計算する。

有効温度 T	質量 m	Δm	有効温度 T	質量 m	Δm
3000	0.14	0.10	10000	3.45	0.42
3500	0.28	0.18	11000	3.99	0.56
4000	0.51	0.22	12000	4.57	0.59
4500	0.70	0.13	13000	5.17	0.62
5000	0.75	0.09	14000	5.80	0.95
5500	0.88	0.17	16000	7.13	1.37
6000	1.10	0.19	18000	8.54	1.46
6500	1.26	0.22	20000	10.05	1.73
7000	1.55	0.28	22500	12.04	2.06
7500	1.80	0.22	25000	14.16	3.31
8000	1.98	0.22	30000	18.92	5.43
8500	2.24	0.34	35000	25.11	6.58
9000	2.67	0.45	40000	32.08	7.36
9500	3.14	0.40	45000	39.81	8.62

表6-5 銀河モデルに用いた28種類の星

①~⑥より年齢 t yr の銀河に含まれる質量 m 前後の星の総質量が求められる。ただし、超巨星・赤色巨星に関しては寄与が不確定であるため、重み ξ をかけた（通常は $\xi = 1$ ）。

$$M'_{\text{star}}(m, t, \Delta m) = (M_{\text{gas}}(t - \tau(m)) - M_{\text{gas}}(t)) I(m) \Delta m$$

$$M'_{\text{AGB}}(m, t, \Delta m) = (M_{\text{gas}}(t - \tau(m) - \tau_g(m)) - M_{\text{gas}}(t - \tau(m))) I(m) \Delta m \cdot \xi$$

これらの値は、死滅した星より放出されるガスを考えていないので、これらの質量の総和が銀河が生まれてから t yr の間に消費されたガスの量 $M_{\text{gas}}(0) - M_{\text{gas}}(t)$ となるようにある倍率を掛けて修正する（すなわち、少々強引ではあるが死滅した星は瞬時に

生まれ変わり、その時点での星の存在比率で定められる新しい星として分配されると考える)。

$$M_{\text{star}}(m, t, \Delta m) = (M_{\text{gas}}(0) - M_{\text{gas}}(t)) M'_{\text{star}} / M_{\text{tot}}$$

$$M_{\text{AGB}}(m, t, \Delta m) = (M_{\text{gas}}(0) - M_{\text{gas}}(t)) M'_{\text{AGB}} / M_{\text{tot}}$$

$$\text{ただし } M_{\text{tot}} = \sum_m M'_{\text{star}} + \sum_m M'_{\text{AGB}}$$

図6-16、6-17に $M_{\text{gal}} = 1 \times 10^{11} M_{\odot}$ の銀河に対する M_{star} と M_{AGB} の時間変化を示す。重い星ほど星生成率の変化に対し敏感に反応し、短い時間で平衡状態に達することが判る。

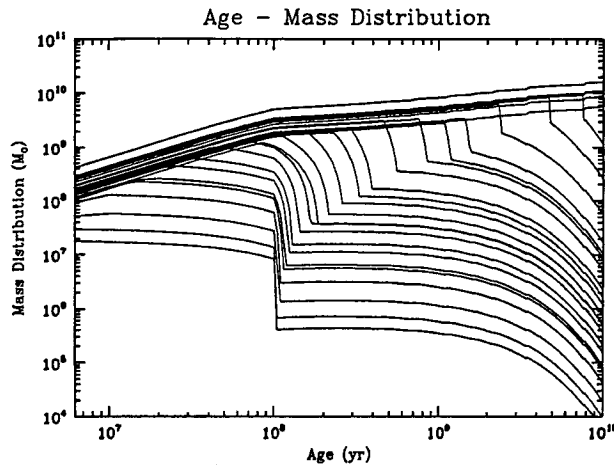


図6-16 各種類の星の量(質量和)の変化
横軸は銀河の年齢 (yr)
縦軸は各階級(表6-5)の星の質量和 (M_{\odot})。
銀河全体の質量は $10^{11} M_{\odot}$ である。

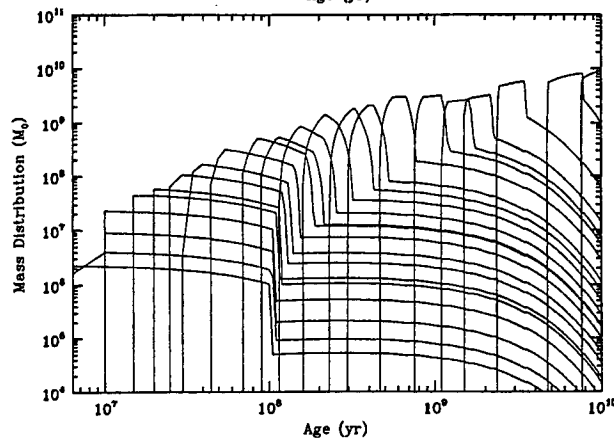


図6-17 超巨星・赤色巨星の量(質量和)の変化
横軸・縦軸は上図と同じ。

銀河全体のスペクトルは、それぞれの星のスペクトルに星の個数を掛けて和をとることによって得られる。

$$S_{\text{gal}}(t, Z, \lambda) = \sum_m S_{\text{star}} \cdot M_{\text{star}} / m + \sum_m S_{\text{AGB}} \cdot M_{\text{AGB}} / m$$

図6-18、6-19に質量 $M_{\text{gal}} = 1 \times 10^{11} M_{\odot}$ 、直径 $D_{\text{gal}} = 10 \text{ kpc}$ の銀河の様々な t についてのスペクトルの進化の様子を表す。銀河の年齢により、A型・B型星の寄与によるバルマー不連続 (Balmer discontinuity) の形状が変化していく様子が判る。実線は減光の効果を考えない場合 ($x = 0$)、点線は進化にしたがって減光の効果を取り入れた場合 (年齢 0.1, 0.3, 1, 3, 10 Gyr に対し、それぞれ $x = 0.25, 0.35, 0.5, 0.7, 1$ とした) である。

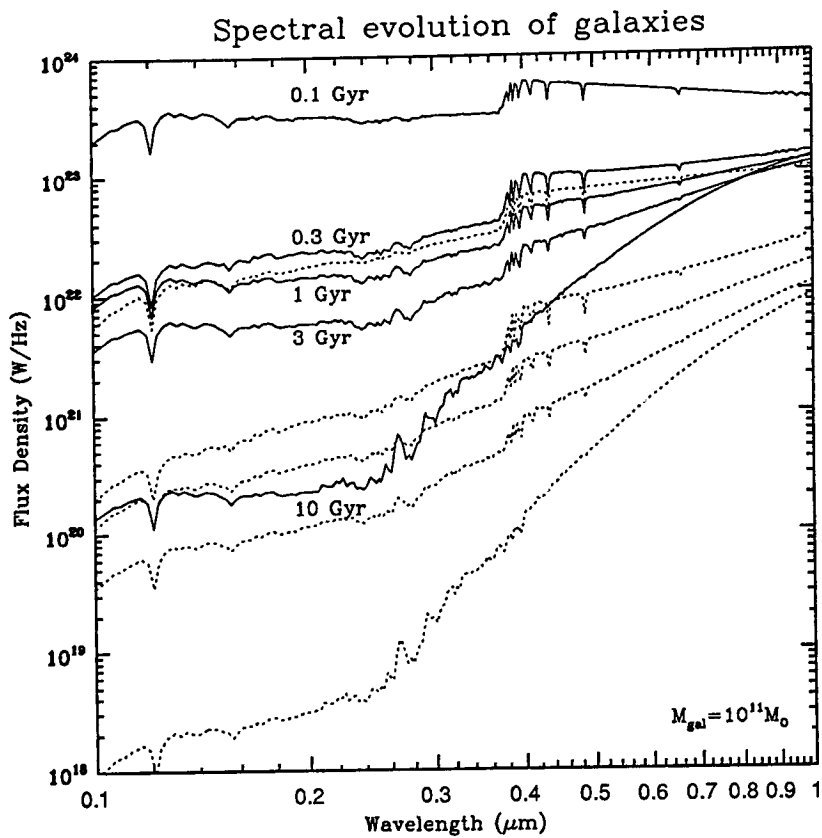


図6-18 銀河のスペクトルの時間変化
 横軸は波長 (μm) 縦軸は単位振動数あたりの輻射強度 (W/Hz)。
 実線は減光の効果を考えない場合、点線は減光の効果徐徐に取り入れた場合である。

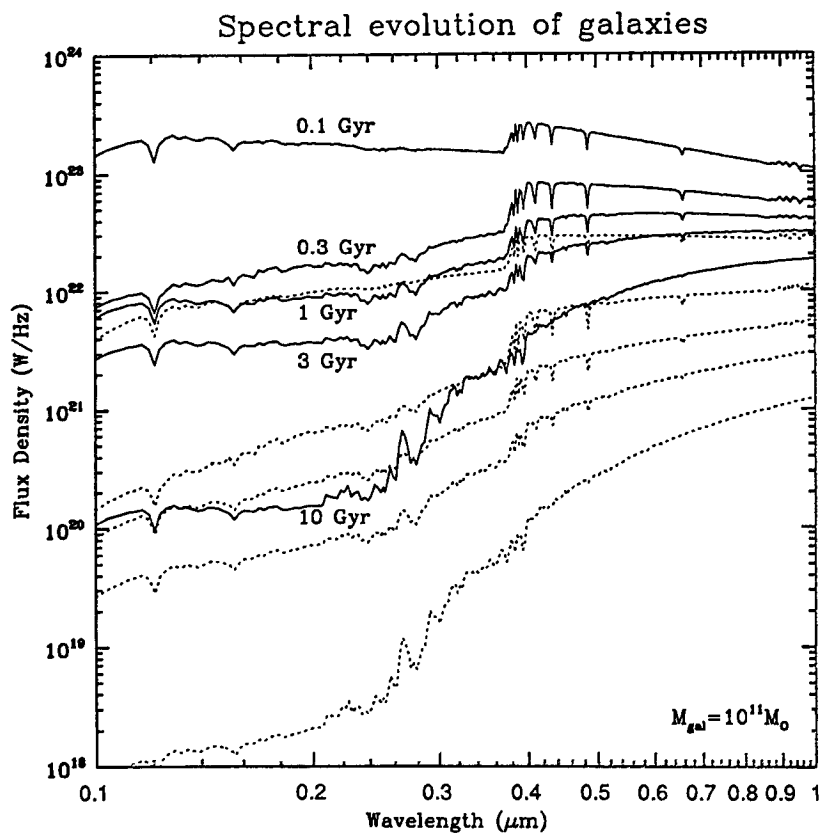


図6-19 銀河のスペクトルの時間変化
 超巨星・赤色巨星の寄与をなくした場合 ($\xi = 0$)
 縦軸・横軸は上図と同じ

6-2-2. 観測シミュレーション

すばるOHSを用いると、どのくらい遠方の、どのくらいの明るさの銀河や、クエーサーが観測できるかを考えるため、前節の銀河やクエーサーのモデルを遠ざけて、すばるOHSで観測するシミュレーションを行なった。このシミュレーションの際必要な事柄は

- ① z と光度距離 $D_L(z)$ の関係
- ② z と視直径 θ に相当する直径 $d(\theta, z)$ の関係
- ③ z と時間 $t(z)$ の関係
- ④ S/N比の計算 (式3-2-1.a~g)

であるが、①~③は宇宙モデルによって定められる関係である。現在、広く用いられている宇宙モデルは、宇宙の膨張速度を表すハッブル定数 H_0 と、自己重力による宇宙膨張の減速の度合を表す減速パラメータ q_0 によって表され、 $q_0 \leq 0.5$ は無限に膨張する開いた宇宙 (特に $q_0 = 0$ は膨張速度が減速しない宇宙、 $q_0 = 0.5$ は素粒子論インフレーションモデルの予言する膨張速度が0に収束しつつ無限に膨張する平坦な宇宙を表す)、 $q_0 > 0.5$ は、膨張の後収縮に転ずる閉じた宇宙を表す。現在までの観測では、 $H_0 = 40 \sim 100$ km/s/Mpc、 $q_0 = 0.02 \sim 0.5$ 程度であることしか判っていないので、ここでは以下の値を用いていくことにする。

定数及び単位: Hubble定数 $H_0 = 75$ km/s/Mpc
 減速パラメータ $q_0 = 0.25$
 Planck定数 $h = 6.626 \times 10^{-27}$ erg s

①: z と光度距離 ($D_L(z)$) の関係

遠方宇宙における地球からの距離は、天体の明るさを基準にして測った距離 (光度距離) と、天体の直径を基準にして測った距離 (角径距離) がある。近傍の宇宙ではこれらの距離は同じ値であるが、 z の値が大きくなるにつれ、この2つの基準で測った距離は異なる値 (光度距離/角径距離 = $(1+z)^2$) となってくる。 z と光度距離の関係は以下の式で表される (図6-20)。

$$D_L(z) = (cz/H_0) \cdot (1+z(1-q_0) / (\sqrt{(1+2q_0z)} + 1 + q_0z)) \quad (\text{ただし、ここでの } c \text{ の単位は km/s}) \quad (\text{Mpc})$$

光度距離 D_L を用いると、実際に観測される輻射エネルギーは、前節最後の S_{gal} を用いて次のように表される。

$$f_{obs}(\lambda) = S_{gal}(t, Z, \lambda) / (4\pi D_L(z)^2 (1+z)) \quad (\text{W/cm}^2/\mu\text{m})$$

(ただし、ここでの D_L の単位は cm)

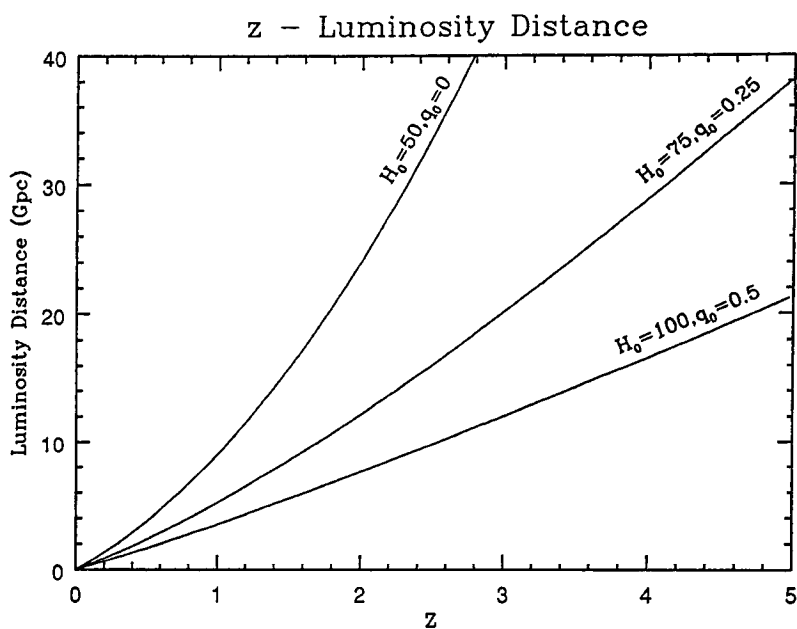


図6-20 光度距離 D_L と赤方偏移 z の関係
最も大きい宇宙 ($H_0 = 50, q_0 = 0$) と、最も小さい宇宙 ($H_0 = 100, q_0 = 0.5$) の場合を比較のため併せて示す。

②: z と視直径 θ に相当する直径 $d(\theta, z)$ の関係

天体の視直径を θ (radian)、天体の実際の直径を d (kpc) とすると

$$d(\theta, z) = D_A(z) \cdot \theta = D_L(z) \cdot \theta / (1+z)^2 \quad (\text{kpc})$$

(D_A : 角径距離、ここでの D_L の単位は kpc)

と表される (図6-21)。視直径 1 arcsec の天体の直径は $\theta = \pi / 180 / 3600$ として計算される。

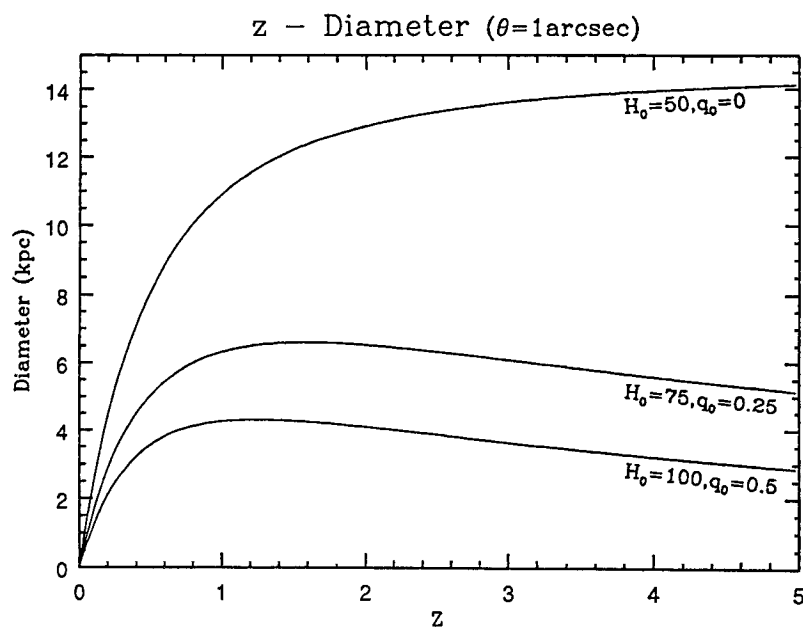


図6-21 天体の直径 d と赤方偏移 z の関係
視直径 $\theta = 1 \text{ arcsec}$ としたときの、天体の直径と z の関係。

③: z と時間 t (z) の関係

宇宙モデルによると、z と t の間には以下の関係がある。

$$d z / d t = - H_0 (1 + z)^2 \sqrt{ 1 + \Omega_0 z } \quad (\Omega_0 = 2 q_0)$$

この式を z = ∞ ~ 0 で積分すると現在の宇宙年齢 t_0 が得られる。

$$t_0 = \begin{cases} 1 / H_0 & (\Omega_0 = 0) \\ 1 / H_0 \cdot (1 / (1 - \Omega_0) - \Omega_0 / (2 (1 - \Omega_0)^{3/2}) \\ \quad \cdot \ln ((2 - \Omega_0) / \Omega_0 + 2 (1 - \Omega_0)^{1/2} / \Omega_0)) & (0 < \Omega_0 < 1) \\ 2 / 3 H_0 & (\Omega_0 = 1) \end{cases}$$

(1 / H_0 = 1 / 75 × 3. 086 × 10¹⁹ 秒 = 130 億年)

q_0 = 0. 25 (Ω_0 = 0. 5) の場合、t_0 = 98 億年となる。これは、様々な観測より現在考えられている値 (100 ~ 200 億年) の中で最も短い年齢である。z と t の関係は上の微分方程式から直接得ることができるが、複雑な式となるため、Ω_0 z > 1 の場合の近似式 d t / d z ∝ (1 + z)^{-5/2} を用いて、

$$t (z) = t_0 (1 + z)^{-3/2} \quad (\text{yr})$$

を得る (計算の簡素化のためこの式を用いる、図 6 - 2 2) 。

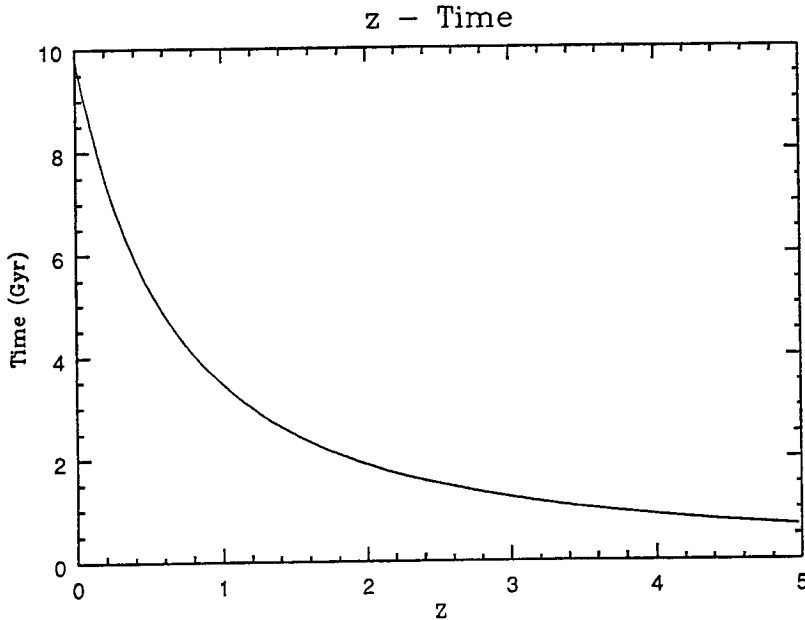


図 6 - 2 2 宇宙誕生からの時間 t と z の関係

④: Signal / Noise 比の計算

O H S を用いて様々な銀河を観測する場合、どの程度の銀河ならば観測可能かどうかを検討するため、z = 3, M_{gal} = 1 × 10¹¹ M_o, D_{gal} = 10 kpc の銀河に対して視直径と f_{obs} (λ) を計算し、式 (3-2-1. a ~ g) を用いて以下の条件で S / N を計算した。

- $D = 820$: 望遠鏡の主鏡直径 (cm)
 $d = 0.12$: 検出器の1素子の視野 (arcsec)
 $r = 1/30$: バックグラウンド除去率
 $\varepsilon = 0.066$: 装置全体の効率
 $R = 100$: 波長分解能 ($\lambda/\Delta\lambda$, すなわち $\Delta\lambda = \lambda/R$ で与えられる)
 $\tau = 1000$: 1回の積分時間 (sec)
 $i = 10$: 積分回数
 $n = 160$: 天体が写る素子数 (天体の視直径は 1.5 arcsec)
 $N_{read} = 1$: 1素子あたりの読みだしノイズ (e r.m.s.: Root Mean Square)
 $I_{dark} = 0.1$: 1素子あたりの暗電流 (e/sec)

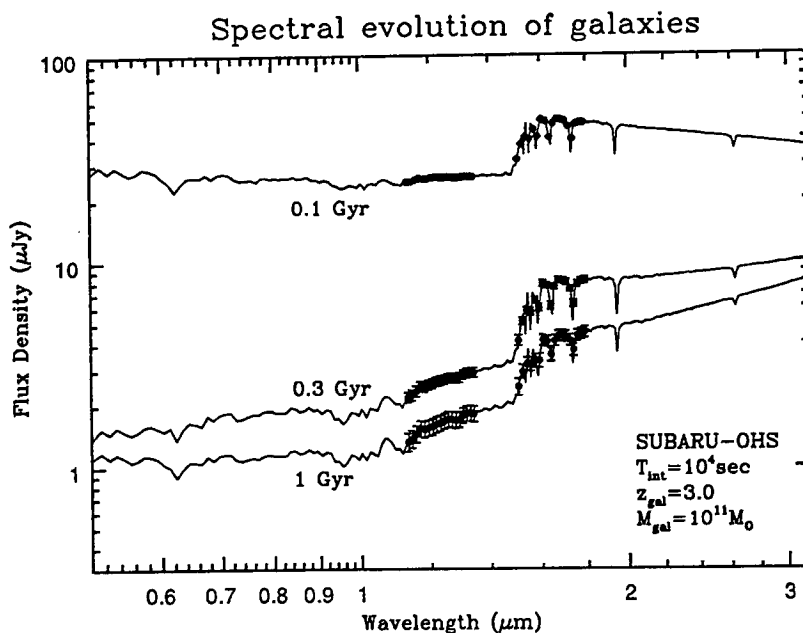


図6-23 すばるOHSによる原始銀河観測
 質量 $10^{11} M_{\odot}$ 、 $z = 3$
 の銀河を 10^4 秒の積分
 時間で観測したシミュレ
 ーション。エラーバーは
 1σ レベルを表す。

これらの値を用いた計算の結果を図6-23に示す。すばるOHSでは $10^{11} M_{\odot}$ 程度の
 巨大な銀河ならば、十分なS/Nで観測できることが判る。質量がもう1桁小さくても
 エラーバーの長さがほぼこの10倍になる)、スターバースト直後の銀河ならば観測は可
 能である。現在、まだこの様な遠方の若い銀河の特徴的な連続スペクトルは観測されてお
 らず、ここに述べたような銀河モデルを用いて予言されているだけであるが、近い将来、
 すばるOHSによって、このような原始銀河の星生成の現場が直接捕らえられ、銀河生成
 がいつ頃から始まったかが解明されるであろう。

クエーサーに関しては、更に遠いものも観測が可能である。現在、遠方クエーサー探査
 のための7つのプロジェクトが進行中であるが(表6-6)、 $z > 5$ のクエーサーはUB
 V等の通常の可視光のバンドでは検出できず(静止波長で912Å以下では、ライマン連
 続吸収(Ly limit)のため急激に暗くなる)、写真乾板での検出はほぼ不可能に近い。そ
 の様なクエーサーを検出するには、CCDを用いたR・Iバンドでの20等より暗い天体
 の検出能力での探査か、もしくは赤外線での探査が必要であるが、現在進められている探

グループ名	方法	検出限界
Osmer et al.	写真乾板 + CCD (6色) 測光	$m_{OR} \leq 2.0$
Koo and Kron	写真乾板 (3色) 測光	$m_{BJ} < 2.2$
McMahon and Irwin	電波 + Rバンド (CCD) 分光	$S_{5GHz} > 0.1 \text{ Jy}$
Schnider et al.	グリズム (CCD) 分光	$m_R \sim 2.0$
Chafee et al.	プリズム (写真乾板) 分光	$m_{BJ} \sim 18.7$

表 6-6 現在進められている主なクエーサー探査

他に、Goldschmidt and Miller (多色測光), Savage et al. (電波) 等のグループがある。

査では $z > 5$ のクエーサーを検出することは、非常に困難である (基本的にはこれらの探査はすべて $2 < z < 4$ (~ 5) のクエーサーを検出するためのものである)。しかし、今後行なわれる予定の、多くの CCD を用いた非常に暗い天体の探査では $z > 5$ のクエーサーが検出される可能性は十分にある。さらに、赤外検出素子を用いた探査では R・I バンドでも検出されない $z > 8$ のクエーサーを検出する可能性もある。OHS は、このような $z > 5$ のクエーサーに対しても非常に重要な観測装置となり (その場合、最終的な波長分解能は 300 程度が望ましい)、他の観測装置では行なうことの難しい分光観測を行なうことができる。図 6-24 に $z = 9$ のクエーサー観測例を示す。すばる OHS は、ごく小数存在する可能性のある超遠方のクエーサーを観測する主力装置としても、重要な役割を果たすものと思われる。

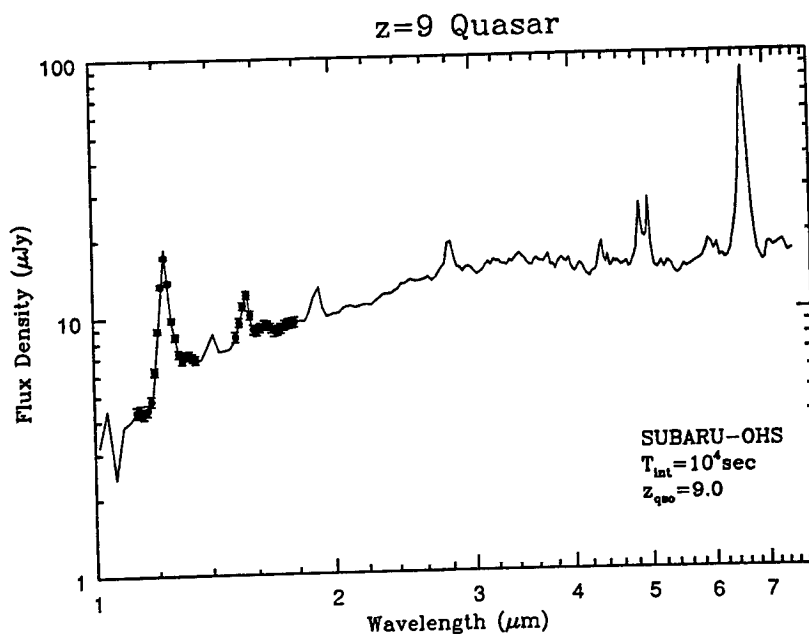


図 6-24 すばる OHS での $z = 9$ クエーサーの観測シミュレーション $M_B = -2.5$. 9 等の標準的な明るさのもの。積分時間は 10^4 秒。

要約

プロトタイプOHSは、ハワイ大2.2m望遠鏡での3度にわたる観測を経て一応の完成度に達した。1994年3月現在のOHSの性能は、夜光除去率 $1/18$ ・光透過効率0.34で、最大で約1等の検出限界向上が認められている。しかし、望遠鏡に直接取り付けられる非常に大型の装置であるため、望遠鏡の方向変化に伴う装置の変形の結果、一分間あたり0.05~0.1 pixel 天体像が移動し、長い露出を行なう上での妨げになっていることと、プリズムが常温であるため、分光時に装置内部の熱輻射が相当なノイズ源となり、 $1.72\mu\text{m}$ カットオフフィルターを用いなければならない(しかも、フィルターシステムに若干の漏れがある)ことが問題となっている。これらの問題点は、今後の観測で少しでも抑えられるよう改良を重ねていく。また、背景光には連続スペクトル成分も存在するため、夜光除去率の限界は $1/40$ 程度であるが、この値に少しでも近く、かつ開口率が高い理想的な夜光マスクを調べていくことも、プロトタイプOHSに課せられた重要な課題である。

現在計画中のすばるOHSでは、傾きが変化しないナスミス焦点に置かれることと、冷却グリズム分光器を用いることにより、これらの問題はすべて解決され、プロトタイプOHSでの経験を生かした装置が計画されている。数年後の大型望遠鏡時代には、遠方の暗い天体が次々と発見され、 $1\sim 2\mu\text{m}$ の波長域での観測は現在よりも格段に重要度が増すであろう。すばるOHSは $2 < z < 4$ の銀河や $z > 5$ のクエーサーの分光観測を、一晩の観測で行なうことができる最も強力な観測装置となるのである。

謝辞

まず、この装置の発案者で研究を指導して頂いた舞原俊憲助教授に感謝致します。舞原氏には、装置の設計から製作、観測、論文作成に至るまで重要なポイントを的確に御指導して頂きました。また、この装置の骨格をなす球面カメラ・マスクミラーの組合せを示唆して頂いた国立天文台の成相恭二氏にもお礼申し上げます。成相氏には、すばるOHSでの双曲コリメータに付いても助言を頂きました。ハワイ大のD.N.B.Hall氏、L.L.Cowie氏、A.T.Tokunaga氏、A.J.Pickles氏ほか、観測を手伝って頂いたマウナケア天文台の方々にも感謝致します。最後になりましたが、OHS可動部のハード・ソフト全てを製作してくれた大屋君、塚本君と、様々な面で協力して頂いた宇宙線研究室の皆様、有難うございました。

この研究は日本学術振興会特別研究員制度と、それに伴う文部省科学研究費補助金の助成を受けて進められました。

参考文献

- 赤羽賢司、海部宣男、田原博人、1988、宇宙電波天文学（共立出版）
- Allen, C. W. 1973, *Astrophysical Quantities* 3. ed.
- Annis, J., and Luppino, G. A. 1993, *Ap. J.*, 407, L69
- Arimoto, N., Yoshii, Y., and Takahara, F. 1992, *Astr. Ap.*, 253, 21
- Blandford, R. D., and Narayan, R. 1992, *Ann. Rev. Astr. Ap.*, 30, 311
- Boroson, T. A., and Green, R. F. 1992, *Ap. J. (Suppl.)*, 80, 109
- Boyle, B. J., Shanks, T., and Peterson, B. A. 1988, *M. N. R. A. S.*, 235, 935
- Casali, M., and Hawarden, T. 1992, *JCMT-UKIRT Newsletter*, No. 4, 33
- Chambers, K. C., and Charlot, S. 1990, *Ap. J. (Letters)*, 348, L1
- Chambers, K. C., and Miley, G. K. 1990, *Ap. J.*, 363, 21
- Charlot, S., Ferrari, F., Mathews, G. J., and Silk, J. 1993, *Ap. J.*, 419, L57
- Cowie, L. L., Songaila, A., Hu, E. M., Wainscoat, R. J., Egami, E., and Huang, J.-S. 1994, *Nature*, submitted.
- Coxon, J. A. 1980, *Can. J. Phys.*, 58, 933
- Coxon, J. A., and Foster, S. C. 1982, *Can. J. Phys.*, 60, 41
- Cristiani, S., and Vio, R. 1990, *Astr. Ap.*, 227, 385
- Eales, S. A., and Rawlings, S. 1993, *Ap. J.*, 411, 67.
- Elston, R., Thompson, K. L., and Hill, G. J. 1994, *Nature*, 367, 250
- Gertz, R. D., Sramek, R. A., and Weedman, D. W. 1983, *Ap. J.*, 267, 551
- Harrison, A. W., Kendall, D. J. W. 1973, *Planet. Space Sci.*, 21, 1731
- Hewitt, J. N., Turner, E. L., Lawrence, C. R., Schneider, D. P., and Brody, J. P. 1992, *A. J.*, 104, 968
- Hill, G. J., Thompson, K. L., and Elston, R. 1993, *Ap. J.*, 414, L1
- Hodapp, K. W., Rayner, J., and Irwin, E. 1992, *P. A. S. P.*, 104, 441
- Hubbard, R., and Brault, J. in private communication
- Iben, I. Jr. 1967, *Ann. Rev. Astr. Ap.*, 5
- Iwamuro, F., Maihara, T., Oya, S., Tsukamoto, H., Hall, D. N. B., Cowie, L. L., Tokunaga, A. T., and Pickles, A. J. 1994, *P. A. S. J.*, submitted
- 家正則、1992、銀河が語る宇宙の進化（培風館）
- Johnson, H. L. 1966, *Ann. Rev. Astr. Ap.*, 4, 193
- Katz, C. A., and Hewitt, J. N. 1993, *Ap. J.*, 409, L9
- Kochanek, C. S. 1991, *Ap. J.*, 373, 354
- Kurucz, R. L. 1979, *Ap. J. Suppl.*, 40, 1
- Lilly, S. J. 1988, *Ap. J.*, 333, 161
- Llewellyn, E. J., Long, B. H., and Solheim, B. H. 1978, *Planet. Space Sci.*, 26, 525
- Maihara, T., Iwamuro, F., Hall, D. N. B., Cowie, L. L., Tokunaga, A. T., and Pickles, A. J. 1993, *S. P. I. E.*, 1946, 581
- Maihara, T., Iwamuro, F., Yamashita, T., Hall, D. N. B., Cowie, L. L., Tokunaga, A. T., and

- Pickles, A. J. 1993, P. A. S. P., 105, 940
- Maihara, T., Iwamuro, F., Oya, S., Tsukamoto, H., Hall, D. N. B., Cowie, L. L., Tokunaga, A. T., and Pickles, A. J. 1994, S. P. I. E., 2198,
- 松居吉哉 1972, レンズ設計法 (共立出版)
- Meinel, A. B. 1950a, Ap. J., 111, 555
- Meinel, A. B. 1950b, Ap. J., 112, 120
- Moorwood, A. F. M. 1987, in *Infrared Astronomy with Arrays*, ed. C. G. Wynn-Williams and E. E. Becklin (Honolulu: University of Hawaii), p. 379
- Mullikin, T. L., and Miller, H. R. 1977, Pub. A. S. P., 89, 639
- Oliva, E., and Origlia, L. 1992, Astr. Ap., 254, 466
- Origlia, L., Moorwood, A. F. M., and Oliva, E. 1993, Astr. Ap., 280, 536
- Paczynski, B. 1986, Ap. J., 304, 1
- Partridge, R. B., and Peebles, P. J. E. 1967a, A. J., 147, 868
- Partridge, R. B., and Peebles, P. J. E. 1967b, A. J., 148, 377
- Pendleton, W., Espy, P., Baker, D., Steed, A., and Fetrow, M. 1989, J. Geophys. Res., 94, 505
- Pei, Y. C., Fall, S. M., and Bechtold, J. 1991, Ap. J., 378, 6
- Prevot, M. L., Lequeux, J., Maurice, E., Prevot, L., and Rocca-Volmerange, B. 1984, Astr. Ap., 132, 389
- Puetter, R. C., Smith, H. E., Willner, S. P., and Pipher, J. L. 1981, Ap. J., 243, 345
- Ramsay, S. K., Mountain, C. M., and Geballe, T. R. 1992, M. N. R. A. S., 259, 751
- Rich, R. M. 1990, Ap. J., 362, 604
- Rocca-Volmerange, B., and Guiderdoni, B. 1988, A. & A. Suppl., 75, 93
- Salpeter, E. E. 1955, Ap. J., 121, 161
- Scalo, J. M. 1986, *The Stellar Initial Mass Function*
- Schneider, D. P., Schmidt, M., and Gunn, J. E. 1989, A. J., 98, 1507
- Schechter, P. L., and Moore, C. B. 1993, 105, 1
- Steed, A. J., and Baker, D. J. 1979, Appl. Opt., 18, No. 20, 3386
- Taylor, M. J., Hapgood, M. A., and Rothwell, P. 1987, Planet. Space Sci., 35, No. 4, 413
- Thompson, K. L. 1992, Ap. J., 395, 403
- Tyson, J. 1988, A. J., 96, 1
- Voit, G. M., Weymann, R. J., and Korista, K. T. 1993, Ap. J., 413, 95
- 山下泰正 1992, 反射望遠鏡 (東京大学出版会)
- Yoshii, Y., and Takahara, F. 1988, Ap. J., 326, 1
- 吉田正太郎 1988, 望遠鏡光学・反射編 (誠文堂新光社)
- 吉田正太郎 1989, 望遠鏡光学・屈折編 (誠文堂新光社)
- Yu, L., Tuan, F. T., and Tai, H. 1980, J. Geophys. Res., 85, 1297
- Warren, S. J., and Hewett, P. C. 1991, Rep. Prog. Phys. 54, 243
- Weymann, R. J., Morris, S. L., Foltz, C. B., and Hewitt, P. C. 1991, Ap. J., 373, 23

A p p e n d i x A
収差公式

収差を計算するためには、2種類の初期値での近軸計算結果が必要となる。ここでは、換算傾角（傾角×屈折率）と入射高の組として $(ao[k], ho[k])$ 、 $(ab[k], hb[k])$ の2組を同時に計算していく。面数は1～N で第 k-1 面と第 k 面の間の屈折率を $N[k]$ とする。c 及び s は、式(2-1-1.a)で与えられる曲率と、形状パラメータである。光は z 軸に沿って進行し、oz は各面の位置を表す。

近軸逆追跡

$$\begin{aligned} ao[N] &= 0 \\ ho[N] &= 1 \\ ab[N] &= -1 \\ hb[N] &= 0 \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} ao[N] &= 0 \\ ho[N] &= 1 \\ ab[N] &= -1 \\ hb[N] &= 0 \end{aligned}} \right\} \text{初期値}$$

$$\begin{aligned} 1/r &= -c[k] \\ \phi &= (N[k-1] - N[k]) / r \\ ed &= (oz[k+1] - oz[k]) / N[k] \\ ho[k-1] &= ho[k] - ao[k] \cdot ed \\ ao[k-1] &= ao[k] + ho[k-1] \cdot \phi \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} 1/r &= -c[k] \\ \phi &= (N[k-1] - N[k]) / r \\ ed &= (oz[k+1] - oz[k]) / N[k] \\ ho[k-1] &= ho[k] - ao[k] \cdot ed \\ ao[k-1] &= ao[k] + ho[k-1] \cdot \phi \end{aligned}} \right\} \begin{array}{l} k=N \sim 1 \text{ で順次計算し} \\ ao[0], ho[0] \text{ を得る。} \end{array}$$

初期値設定

$$\begin{aligned} dt1 &= (1 - ho[0]) / ao[0] \\ gg &= dt1 + oz[1] - oz[0] \\ R &= gg / f / 2 \\ \tan \omega &= W / gg \\ ao[0] &= -1 / gg \\ ho[0] &= 0 \\ ab[0] &= -gg / gp \\ hb[0] &= -gg \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} dt1 &= (1 - ho[0]) / ao[0] \\ gg &= dt1 + oz[1] - oz[0] \\ R &= gg / f / 2 \\ \tan \omega &= W / gg \\ ao[0] &= -1 / gg \\ ho[0] &= 0 \\ ab[0] &= -gg / gp \\ hb[0] &= -gg \end{aligned}} \right\} \begin{array}{l} dt1: \text{第1面と物体側主平面の間隔} \\ gg: \text{入射面と物体側主平面の間隔} \\ R: \text{半口径、} f: \text{入射F比} \\ W: \text{入射窓の半分、} \omega: \text{半画面角} \\ gp: \text{入射面と入射瞳の間隔} \end{array}$$

収差初期値

$$\begin{aligned} I &= 0 \\ II &= 0 \\ III &= 0 \\ IV &= 0 \\ V &= 0 \\ L &= 0 \\ T &= 0 \\ Is &= 0 \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} I &= 0 \\ II &= 0 \\ III &= 0 \\ IV &= 0 \\ V &= 0 \\ L &= 0 \\ T &= 0 \\ Is &= 0 \end{aligned}} \right\} \begin{array}{l} I: \text{球面収差} \\ II: \text{コマ収差} \\ III: \text{非点収差} \\ IV: \text{像面弯曲} \\ V: \text{歪曲} \\ L: \text{軸上色収差} \\ T: \text{倍率色収差} \\ Is: \text{輪帯球面収差} \end{array}$$

$I_z = 0$	I_z : 球面収差の付加収差
$I_f = 0$	I_f : 羽根状収差
$I_h = 0$	I_h : 周辺球面収差
$\Pi_x = 0$	Π_x : 輪帯コマの付加収差
$\Pi_s = 0$	Π_s : 輪帯コマ収差
$\Pi_p = 0$	Π_p : 矢状収差
$\Pi_z = 0$	Π_z : コマ付加収差
$\Pi_h = 0$	Π_h : 周辺コマ収差
$\text{III}h = 0$	$\text{III}h$: 周辺非点収差
$\text{IV}h = 0$	$\text{IV}h$: 周辺像面弯曲
$\text{V}h = 0$	$\text{V}h$: 周辺歪曲
$pI = 0$	pI : 瞳の球面収差
$p\Pi = 0$	$p\Pi$: 瞳のコマ収差
$p\text{III} = 0$	$p\text{III}$: 瞳の非点収差
$p\text{IV} = 0$	$p\text{IV}$: 瞳の像面弯曲
$p\text{V} = 0$	$p\text{V}$: 瞳の歪曲
$P = 0$	P : ピッツバール和
$pI_s = 0$	pI_s : 瞳の輪帯球面収差

収差の計算 (k=1~N まで繰り返し計算)

$$\begin{aligned}
 1/r &= -c[k] \\
 a &= -(s[k]-1)c[k]^3 \\
 b &= -(s[k]^2-1)c[k]^5 \\
 \phi &= (N[k]-N[k-1])/r \\
 ed &= (oz[k]-oz[k-1])/N[k-1] \\
 ho[k] &= ho[k-1] - ao[k-1] \cdot ed \\
 ao[k] &= ao[k-1] + ho[k] \cdot \phi \\
 hb[k] &= hb[k-1] - ab[k-1] \cdot ed \\
 ab[k] &= ab[k-1] + hb[k] \cdot \phi
 \end{aligned}$$

2組の近軸計算

$$\begin{aligned}
 hqo &= ho[k] \cdot N[k-1]/r - ao[k-1] \\
 hqb &= hb[k] \cdot N[k-1]/r - ab[k-1] \\
 hdo &= ao[k]/N[k]^2 - ao[k-1]/N[k-1]^2 \\
 hdb &= ab[k]/N[k]^2 - ab[k-1]/N[k-1]^2 \\
 P[k] &= (1/N[k-1] - 1/N[k])/r \\
 \Psi &= (N[k]-N[k-1])a \\
 \Omega &= 3(N[k]-N[k-1])b \\
 rI &= hqo^2 \cdot hdo \\
 r\Pi &= hqo \cdot hqb \cdot hdo
 \end{aligned}$$

補助量の計算

$$r_{III} = hqb^2 \cdot hdo$$

$$\begin{aligned} I[k] &= (r_I + \Psi \cdot ho[k]^3) ho[k] \\ II[k] &= (r_{II} + \Psi \cdot hb[k] \cdot ho[k]^2) ho[k] \\ III[k] &= (r_{III} + \Psi \cdot hb[k]^2 \cdot ho[k]) ho[k] \\ IV[k] &= III[k] + P[k] \end{aligned}$$

3次収差の計算

$$\begin{aligned} V[k] &= (r_{III} + \Psi \cdot hb[k]^2 \cdot ho[k]) hb[k] + hqb \cdot hdb \\ L[k] &= hqo \cdot ho[k] (\delta N[k] / N[k] - \delta N[k-1] / N[k-1]) \\ T[k] &= hqb \cdot ho[k] (\delta N[k] / N[k] - \delta N[k-1] / N[k-1]) \end{aligned}$$

色収差の計算
 δN は波長による
 屈折率変化量

$$\begin{aligned} q_I &= hqb^2 \cdot hdb \\ q_{II} &= hqb \cdot hqo \cdot hdb \\ q_{III} &= hqo^2 \cdot hdb \end{aligned}$$

補助量の計算

$$\begin{aligned} p_I[k] &= (q_I + \Psi \cdot hb[k]^3) hb[k] \\ p_{II}[k] &= (q_{II} + \Psi \cdot hb[k]^2 \cdot ho[k]) hb[k] \\ p_{III}[k] &= (q_{III} + \Psi \cdot hb[k] \cdot ho[k]^2) hb[k] \\ p_{IV}[k] &= p_{III}[k] + P[k] \\ p_V[k] &= (q_{III} + \Psi \cdot ho[k]^2 \cdot hb[k]) ho[k] - hqo \cdot hdo \end{aligned}$$

瞳の3次収差の計算

$$\begin{aligned} hoa &= ho[k] / r \\ hba &= hb[k] / r \\ rs12 &= hoa (hoa - 2 ao[k-1] / N[k-1]) - hqo \cdot hdo \\ rt12 &= hba (hba - 2 ab[k-1] / N[k-1]) - hqb \cdot hdb \\ ss13 &= ao[k] / N[k] - 3 ao[k-1] / N[k-1] \\ tt13 &= ab[k] / N[k] - 3 ab[k-1] / N[k-1] \\ ndns &= hdo / N[k] + P[k] \cdot ho[k] / N[k-1] \\ ndnt &= hdb / N[k] + P[k] \cdot hb[k] / N[k-1] \\ qbp &= 2 hqb \cdot P[k] \cdot hb[k] - hba \cdot hba \end{aligned}$$

以降、5次収差計算のための
 ための補助量

$$\begin{aligned} r_I s &= 3 r_I \cdot ho[k] \cdot rs12 \\ q_I s &= 3 q_I \cdot hb[k] \cdot rt12 \\ r_{II} x &= hoa \cdot hqo \cdot hdo \cdot ss13 \\ r_{II} s &= 3 r_{II} \cdot ho[k] \cdot rs12 - r_{II} x \\ r_I z &= hoa \cdot hqb \cdot hdo \cdot ss13 + hoa / r \cdot hdo \\ r_I f &= 3 r_{III} \cdot ho[k] \cdot rs12 - hoa \cdot hqb \cdot hdo \cdot ss13 - r_I z \\ r_I h &= r_I f + hqo / r \cdot ndns \\ r_V h &= 3 q_I \cdot ho[k] \cdot rt12 - 2 hba \cdot hqb^2 \cdot ndnt - hqb \cdot P[k] \cdot hb[k] \cdot qbp \\ r_{IV} h &= 3 q_{II} \cdot ho[k] \cdot rt12 - 2 hba \cdot hqb \cdot hqo \cdot ndnt - hqo \cdot P[k] \cdot hb[k] \cdot qbp \\ r_{III} h &= r_{IV} h + hoa \cdot hqb \cdot hdb \cdot tt13 - hqb / r \cdot ndnt - P[k] \cdot qbp \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
r \text{ II } h &= 3 q \text{ III } \cdot ho[k] \cdot rt12 + hoa \cdot hqo \cdot hdb \cdot tt13 \\
&\quad - hqo / r \cdot (hqo \cdot hb[k] + hqb \cdot ho[k]) \text{ ndnt} - hqo \cdot P[k] \cdot ho[k] \cdot qbp \\
r \text{ II } p &= r \text{ II } h + hoa \cdot hqo \cdot hdb \cdot tt13 - hqo / r \cdot \text{ndnt} - hoa \cdot P[k] \cdot tt13 \\
r \text{ II } z &= hoa \cdot hqo \cdot hdb \cdot tt13 - hoa \cdot P[k] \cdot tt13 + P[k]^2 \\
n3hqo &= 3 / N[k] \cdot (2 / N[k] + 1 / N[k-1]) hqo^2 + 6 hqo \cdot ho[k] \cdot P[k] - 9 hoa^2 \\
n3hqb &= 3 / N[k] \cdot (3 / N[k] + 1 / N[k-1]) hqb^2 + 6 hqb \cdot hb[k] \cdot P[k] - 9 hba^2 \\
n1hqo &= 1 / N[k] \cdot (2 / N[k] + 1 / N[k-1]) hqo + ho[k] \cdot P[k] \\
n1hqb &= 1 / N[k] \cdot (2 / N[k] + 1 / N[k-1]) hqb + hb[k] \cdot P[k] \\
nn2hqo &= 2 / N[k]^2 \cdot hqo + ho[k] \cdot P[k] - 2 / N[k] \cdot hoa \\
nn2hqb &= 2 / N[k]^2 \cdot hqb + hb[k] \cdot P[k] - 2 / N[k] \cdot hba \\
nn1hqb &= -1 / N[k-1] / N[k] \cdot hqb - 2 / N[k] \cdot hba \\
n1n &= 1 / N[k] \cdot (1 / N[k] + 1 / N[k-1]) \\
t \text{ I } s &= r \text{ I } s + n3hqo \cdot ho[k]^4 \cdot \Psi + ho[k]^6 \cdot \Omega \\
s \text{ I } s &= q \text{ I } s + n3hqb \cdot hb[k]^4 \cdot \Psi + hb[k]^6 \cdot \Omega \\
t \text{ II } x &= r \text{ II } x + nn2hqo \cdot ho[k]^3 \cdot \Psi \\
t \text{ II } s &= r \text{ II } s + (n3hqo \cdot hb[k] + n1hqo) ho[k]^3 \cdot \Psi + ho[k]^5 \cdot hb[k] \cdot \Omega \\
t \text{ I } z &= r \text{ I } z + (nn2hqo \cdot hb[k] + 1 / N[k]^2) ho[k]^2 \cdot \Psi \\
t \text{ I } f &= r \text{ I } f + (n3hqo \cdot hb[k] + 2 n1hqo) ho[k]^2 \cdot hb[k] \cdot \Psi + ho[k]^4 \cdot hb[k]^2 \cdot \Omega \\
t \text{ II } p &= r \text{ II } p + (n3hqb \cdot ho[k] - 2 n1hqb + nn1hqb) ho[k]^2 \cdot hb[k] \cdot \Psi \\
&\quad + ho[k]^3 \cdot hb[k]^3 \cdot \Omega \\
t \text{ I } h &= r \text{ I } h + ((n3hqo \cdot hb[k] + 2 n1hqo) hb[k] + n1n) ho[k]^2 \cdot \Psi \\
&\quad + ho[k]^4 \cdot hb[k]^2 \cdot \Omega \\
t \text{ II } z &= r \text{ II } z + nn2hqb \cdot ho[k]^2 \cdot hb[k] \cdot \Psi \\
t \text{ II } h &= r \text{ II } h + ((n3hqb \cdot ho[k] - 3 n1hqb) ho[k] + n1n) ho[k] \cdot hb[k] \cdot \Psi \\
&\quad + ho[k]^3 \cdot hb[k]^3 \cdot \Omega \\
t \text{ III } h &= r \text{ III } h + (n3hqb \cdot ho[k] - n1hqb + nn1hqb) ho[k] \cdot hb[k]^2 \cdot \Psi \\
&\quad + ho[k]^2 \cdot hb[k]^4 \cdot \Omega \\
t \text{ IV } h &= r \text{ IV } h + ((n3hqb \cdot ho[k] - 2 n1hqb) ho[k] + 1 / N[k-1]^2) hb[k]^2 \cdot \Psi \\
&\quad + ho[k]^2 \cdot hb[k]^4 \cdot \Omega \\
t \text{ V } h &= r \text{ V } h + (n3hqb \cdot ho[k] + nn1hqb) hb[k]^3 \cdot \Psi + ho[k] \cdot hb[k]^5 \cdot \Omega
\end{aligned}$$

5次取差の計算

$$\begin{aligned}
I \text{ s}[k] &= t \text{ I } s + 6 I[k] \cdot p \text{ V} - 6 II[k] \cdot I \\
p \text{ I } s[k] &= s \text{ I } s - 6 p \text{ I}[k] \cdot V + 6 p \text{ II}[k] \cdot p \text{ I} \\
II \text{ x}[k] &= t \text{ II } x - I[k] (2 p \text{ III} - P) + 2 II[k] (p \text{ V} + II) - (2 III[k] - P[k]) I \\
II \text{ s}[k] &= t \text{ II } s + I[k] (4 p \text{ III} + P) + 2 II[k] (p \text{ V} - 2 II) - (2 III[k] + P[k]) I \\
I \text{ z}[k] &= t \text{ I } z - I[k] \cdot p \text{ II} + II[k] (III + 2 P) + 2 P[k] \cdot II + III[k] \cdot p \text{ V} - V[k] \cdot I \\
I \text{ f}[k] &= t \text{ I } f + 2 I[k] \cdot p \text{ II} + 2 II[k] (2 p \text{ III} - III) - 2 (2 III[k] + P[k]) II \\
II \text{ p}[k] &= t \text{ II } p + 4 II[k] \cdot p \text{ II} + 2 III[k] (p \text{ III} - 2 III) - 2 V[k] \cdot II \\
I \text{ h}[k] &= t \text{ I } h + 3 I[k] \cdot p \text{ II} + II[k] (2 p \text{ III} - 3 III - P)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + (\text{III}[k] + P[k]) (pV - 2\Pi) - V[k] \cdot I \\
\Pi z[k] &= t\Pi z - 2\Pi[k] \cdot p\Pi + \text{III}[k] (2p\text{III} + 2\text{III} + 3P) \\
& + P[k] (3\text{III} + 2P) - 2V[k] \cdot \Pi \\
\Pi h[k] &= t\Pi h + I[k] \cdot pI + \Pi[k] (4p\Pi - V) + \text{III}[k] (p\text{III} - 4\text{III} - 2P) \\
& + P[k] (p\text{III} - 3\text{III} - P) - V[k] \cdot \Pi \\
\text{III} h[k] &= t\text{III} h + 2\Pi[k] \cdot pI + 2\text{III}[k] (2p\Pi - V) + P[k] \cdot p\Pi - V[k] (4\text{III} + P) \\
\text{IV} h[k] &= t\text{IV} h + 4\Pi[k] \cdot pI + 2(\text{III}[k] + P[k]) (p\Pi - 2V) - 2V[k] (\text{III} + P) \\
V h[k] &= tV h + 2(3\text{III}[k] + P[k]) pI - 6V[k] \cdot V
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I s &= I s + I s[k] \\
I z &= I z + I z[k] \\
I f &= I f + I f[k] \\
I h &= I h + I h[k] \\
\Pi x &= \Pi x + \Pi x[k] \\
\Pi s &= \Pi s + \Pi s[k] \\
\Pi p &= \Pi p + \Pi p[k] \\
\Pi z &= \Pi z + \Pi z[k] \\
\Pi h &= \Pi h + \Pi h[k] \\
\text{III} h &= \text{III} h + \text{III} h[k] \\
\text{IV} h &= \text{IV} h + \text{IV} h[k] \\
V h &= V h + V h[k] \\
p I s &= p I s + p I s[k]
\end{aligned}$$

5 次収差の和

$$\begin{aligned}
I &= I + I[k] \\
\Pi &= \Pi + \Pi[k] \\
\text{III} &= \text{III} + \text{III}[k] \\
\text{IV} &= \text{IV} + \text{IV}[k] \\
V &= V + V[k] \\
P &= P + P[k]
\end{aligned}$$

3 次収差の和
(5 次収差の計算が終わってから和を取る)

ピッツバール和

$$\begin{aligned}
p I &= p I + p I[k] \\
p \Pi &= p \Pi + p \Pi[k] \\
p \text{III} &= p \text{III} + p \text{III}[k] \\
p \text{IV} &= p \text{IV} + p \text{IV}[k] \\
p V &= p V + p V[k] \\
L &= L + L[k] \\
T &= T + T[k]
\end{aligned}$$

瞳の 3 次収差の和

色収差の和

k を 1 増やし「収差の計算」に戻る。

$$\begin{aligned}
ed &= (oz[N+1] - oz[N]) / N[N] \\
ho[N+1] &= ho[N] - ao[N] \cdot ed
\end{aligned}$$

最後に焦点面での位置 ho[N+1] の計算

物体側主平面と光線の交点を、物体側主平面上で極座標表示にした場合の角度を ϕ とする。

Δx 方向に対して、

$$f_{1,0} = h_0 [N+1] \cos \phi - L \cos \phi / 2 a_0 [N]$$

$$f_{0,1} = -T / 2 a_0 [N]$$

$$f_{3,0} = -I \cos \phi / 2 a_0 [N]$$

$$f_{2,1} = -II (2 + \cos 2 \phi) / 2 a_0 [N]$$

$$f_{1,2} = -(2 III + IV) \cos \phi / 2 a_0 [N]$$

$$f_{0,3} = -V / 2 a_0 [N]$$

$$f_{5,0} = -I s \cdot \cos \phi / 8 a_0 [N]$$

$$f_{4,1} = -(II s (3 + 2 \cos 2 \phi) + II x) / 8 a_0 [N]$$

$$f_{3,2} = -(I h + I f (3 + \cos 2 \phi) + 2 I z) \cos \phi / 4 a_0 [N]$$

$$f_{2,3} = -(II h (2 + \cos 2 \phi) + II p (1 + \cos 2 \phi) + II z) / 4 a_0 [N]$$

$$f_{1,4} = -(4 III h + IV h) \cos \phi / 8 a_0 [N]$$

$$f_{5,0} = -V h / 8 a_0 [N]$$

Δy 方向に対して

$$f_{1,0} = h_0 [N+1] \sin \phi - L \sin \phi / 2 a_0 [N]$$

$$f_{0,1} = 0$$

$$f_{3,0} = -I \sin \phi / 2 a_0 [N]$$

$$f_{2,1} = -II \sin 2 \phi / 2 a_0 [N]$$

$$f_{1,2} = -IV \sin \phi / 2 a_0 [N]$$

$$f_{0,3} = 0$$

$$f_{5,0} = -I s \cdot \sin \phi / 8 a_0 [N]$$

$$f_{4,1} = -II s \cdot \sin 2 \phi / 4 a_0 [N]$$

$$f_{3,2} = -(I h + I f (1 + \cos 2 \phi)) \sin \phi / 4 a_0 [N]$$

$$f_{2,3} = -II h \cdot \sin 2 \phi / 4 a_0 [N]$$

$$f_{1,4} = -IV h \cdot \sin \phi / 8 a_0 [N]$$

$$f_{0,5} = 0$$

これらの式は 松居吉哉 著「レンズ設計法」より引用し、変形したものである。

A p p e n d i x B
夜光輝線データ

クーデ分光器による夜光観測結果と 夜光マスク製作のためのデータ

Coxon(1980), Coxon and Foster(1982) らのOH分子モデルから予想される輝線の位置と、Steed and Baker(1979), Oliva and Origlia(1992) らの観測結果、Hubbard and Brault の実験結果を比較し、我々がUH88クーデ分光器で観測した結果を併せてマスクすべき輝線を検討した。マスク位置は基本的にはSteed and Bakerのデータを用いたが、他の結果と矛盾している部分、O₂の輝線等に関しては我々の観測結果等を用いて決定した。

グラフ中、最上段の長方形はマスクの位置と大まかなサイズを表しており、黒丸の付いているものがHバンド用マスク、付いていないものがJバンド用マスクである。その下の縦線は、上から順にHubbard and Brault, Oliva and Origlia, Steed and Baker, Coxon + Coxon and Foster らのデータが示す輝線の位置を表している。

参考文献

- Coxon, J. A. 1980, Can. J. Phys., 58, 933
Coxon, J. A., and Foster, S. C. 1982, Can. J. Phys., 60, 41
Oliva, E., and Origlia, L. 1992, A. & A., 254, 466
Hubbard, R., and Brault, J.
Steed, A. J., and Baker, D. J. 1979, Appl. Opt., 18, No. 20, 3386

C : Coxon, J.A. 1980, Can.J.Phys., 58, 933
 CF: Coxon, J.A., and Foster, S.C. 1982, Can.J.Phys., 60, 41
 OO: Oliva, E., and Origlia, L. 1992, A.&A., 254, 466
 HB: Hubbard, R., and Brault, J.
 SB: Steed, A.J., and Baker, D.J. 1979, Appl.Opt., 18, No.20, 3386

----- C & CF -----			OO	----- HB -----		----- SB -----	
Level	W.L. (um)	DBL. (A)	Int.	W.L. (um)	Int.	W.L. (um)	Int.
OH(6-3)R1(6)	1.12882	0.13					
OH(6-3)R1(7)	1.12907	0.07					
OH(6-3)R2(6)	1.12908	0.17					
OH(6-3)R1(5)	1.12912	0.18					
OH(6-3)R2(7)	1.12921	0.17					
OH(5-2)P2(8)	1.12943	0.68					
OH(6-3)R2(5)	1.12955	0.16					
OH(6-3)R1(8)	1.12987	0.01					
OH(6-3)R2(8)	1.12993	0.14					
OH(6-3)R1(4)	1.12994	0.19					
OH(5-2)P1(8)	1.13059	1.30					
OH(6-3)R2(4)	1.13063	0.13	0.03				
OH(6-3)R1(3)	1.13128	0.17	0.03			1.13134	0.12
OH(6-3)R2(3)	1.13234	0.08	0.05				
OH(6-3)R1(2)	1.13312	0.14	0.05			1.13314	0.15
OH(6-3)R2(2)	1.13469	0.01	0.03				
OH(6-3)R1(1)	1.13542	0.10	0.03			1.13544	0.10
OH(6-3)R2(1)	1.13771	0.08				1.14364	0.40
OH(6-3)Q2(1)	1.14378	0.02	0.20				
OH(6-3)Q1(1)	1.14399	0.02	0.20				
OH(6-3)Q2(2)	1.14472	0.04	0.09				
OH(6-3)Q1(2)	1.14516	0.05	0.09				
OH(6-3)Q2(3)	1.14628	0.04					
OH(6-3)Q1(3)	1.14683	0.12					
OH(6-3)Q2(4)	1.14844	0.01					
OH(6-3)Q1(4)	1.14903	0.20					
OH(6-3)P2(2)	1.15086	0.14					
OH(6-3)Q2(5)	1.15117	0.06					
OH(6-3)Q1(5)	1.15178	0.29					
OH(6-3)P1(2)	1.15388	0.17	0.32			1.15395	0.32
OH(6-3)Q2(6)	1.15449	0.14					
OH(6-3)Q1(6)	1.15508	0.40					
OH(6-3)P2(3)	1.15652	0.07	0.06			1.15665	0.02
OH(6-3)Q2(7)	1.15839	0.23					
OH(6-3)Q1(7)	1.15896	0.55					
OH(6-3)P1(3)	1.15917	0.32	0.32			1.15925	0.35
OH(6-3)P2(4)	1.16278	0.05	0.18			1.16285	0.12
OH(6-3)Q2(8)	1.16287	0.33					
OH(6-3)Q1(8)	1.16342	0.70					
OH(6-3)P1(4)	1.16507	0.51	0.29			1.16515	0.30
OH(6-3)P2(5)	1.16963	0.21	0.10			1.16965	0.08
OH(6-3)P1(5)	1.17161	0.71	0.20			1.17165	0.20
OH(6-3)P2(6)	1.17708	0.38				1.17715	0.04
						1.17875	0.08
OH(6-3)P1(6)	1.17880	0.92	0.12				
OH(6-3)P2(7)	1.18514	0.58				1.18646	0.02
OH(6-3)P1(7)	1.18665	1.14	0.05				
OH(6-3)P2(8)	1.19384	0.78					
OH(6-3)P1(8)	1.19517	1.41					
OH(7-4)R1(6)	1.19679	0.07					
OH(7-4)R1(5)	1.19688	0.14					
OH(7-4)R2(6)	1.19706	0.26					

OH(7-4)R1(7)	1.19732	0.01					
OH(7-4)R2(5)	1.19735	0.25	0.03				
OH(7-4)R2(7)	1.19745	0.26					
OH(7-4)R1(4)	1.19758	0.15	0.03				
OH(7-4)R2(4)	1.19833	0.22	0.07				
OH(7-4)R1(8)	1.19848	0.11					
OH(7-4)R2(8)	1.19852	0.22					
OH(7-4)R1(3)	1.19886	0.16	0.07				
OH(7-4)R2(3)	1.20001	0.13	0.14			1.20016	0.12
OH(7-4)R1(2)	1.20070	0.14	0.14			1.20076	0.20
OH(7-4)R2(2)	1.20242	0.05	0.18			1.20256	0.18
OH(7-4)R1(1)	1.20308	0.10	0.18			1.20316	0.24
OH(7-4)R2(1)	1.20559	0.05	0.11	1.20559	0.09	1.20559	0.07
OH(7-4)Q2(1)	1.21204	0.04	0.35	1.21206	0.08		
				1.21226	0.35		
				1.21226	0.35		
OH(7-4)Q1(1)	1.21226	0.01	0.35	1.21227	0.33	1.21226	0.54
OH(7-4)Q2(2)	1.21311	0.08	0.12	1.21357	0.16		
OH(7-4)Q1(2)	1.21359	0.05	0.12	1.21361	0.16	1.21359	0.20
OH(7-4)Q2(3)	1.21487	0.09	0.04	1.21545	0.07		
OH(7-4)Q1(3)	1.21549	0.13	0.04	1.21554	0.07	1.21550	0.05
OH(7-4)Q2(4)	1.21730	0.05					
OH(7-4)Q1(4)	1.21799	0.23		1.21807	0.04		
				1.21963	0.14		
OH(7-4)P2(2)	1.21964	0.17	0.15	1.21965	0.13	1.21964	0.11
OH(7-4)Q2(5)	1.22040	0.03					
OH(7-4)Q1(5)	1.22111	0.35					
OH(7-4)P1(2)	1.22292	0.17	0.42	1.22292	0.31	1.22293	0.40
				1.22294	0.30		
OH(7-4)Q2(6)	1.22416	0.05					
OH(7-4)Q1(6)	1.22486	0.48		1.22577	0.22		
OH(7-4)P2(3)	1.22577	0.12	0.18	1.22578	0.20	1.22578	0.18
				1.22854	0.01		
OH(7-4)Q2(7)	1.22859	0.15		1.22868	0.43		
OH(7-4)P1(3)	1.22869	0.33	0.51	1.22872	0.41	1.22870	0.46
				1.22924	0.03		
				1.22924	0.03		
OH(7-4)Q1(7)	1.22927	0.65					
OH(7-4)P2(4)	1.23259	0.00	0.16	1.23259	0.39	1.23259	0.17
				1.23259	0.39		
OH(7-4)Q2(8)	1.23369	0.26		1.23378	0.02		
				1.23379	0.03		
				1.23403	0.03		
OH(7-4)Q1(8)	1.23434	0.83		1.23513	0.42		
OH(7-4)P1(4)	1.23515	0.54	0.38	1.23519	0.40	1.23516	0.30
				1.23781	0.04		
				1.23965	0.02		
				1.24008	0.21		
OH(7-4)P2(5)	1.24008	0.16	0.09	1.24010	0.19	1.24009	0.11
				1.24230	0.37	1.24230	0.19
OH(7-4)P1(5)	1.24233	0.76	0.23	1.24277	0.02		
				1.24278	0.03		
				1.24743	0.05		
				1.24825	0.05		
				1.24825	0.15		
OH(7-4)P2(6)	1.24827	0.31	0.04	1.24829	0.12	1.24827	0.04
				1.24957	0.08		
				1.25019	0.25		
OH(7-4)P1(6)	1.25024	1.01	0.08	1.25029	0.26	1.25024	0.09
				1.25256	0.06		
				1.25713	0.11		
OH(7-4)P2(7)	1.25715	0.51		1.25718	0.10		
				1.25884	0.15		

OH(7-4)P1(7)	1.25890	1.26	0.07	1.25896	0.15	1.25891	0.05
				1.25990	0.03		
				1.26247	0.04		
				1.26253	0.03		
				1.26267	0.03		
				1.26268	0.03		
				1.26302	0.06		
				1.26520	0.03		
				1.26673	0.06		
OH(7-4)P2(8)	1.26677	0.72		1.26681	0.07		
				1.26683	0.03		
				1.26775	0.03		
				1.26825	0.08		
OH(7-4)P1(8)	1.26832	1.56		1.26840	0.10		
				1.26919	0.03		
				1.26919	0.03		
				1.27131	0.03		
				1.27134	0.04		
				1.27134	0.03		
				1.27206	0.08		
				1.27407	0.07		
				1.27479	0.10		
OH(8-5)R1(5)	1.27480	0.07	0.06	1.27480	0.15		
				1.27501	0.13		
				1.27501	0.13		
OH(8-5)R1(6)	1.27502	0.02	0.06	1.27527	0.24		
OH(8-5)R1(4)	1.27528	0.12	0.06	1.27529	0.31	1.27528	0.15
				1.27529	0.31		
				1.27529	0.31		
OH(8-5)R2(6)	1.27530	0.27					
OH(8-5)R2(5)	1.27531	0.26		1.27531	0.07		
				1.27531	0.07		
				1.27595	0.06		
OH(8-5)R1(7)	1.27595	0.13		1.27596	0.04		
				1.27606	0.04		
				1.27607	0.03		
OH(8-5)R2(7)	1.27608	0.23		1.27609	0.14		
OH(8-5)R2(4)	1.27611	0.22	0.17	1.27611	0.16		
				1.27612	0.02		
				1.27643	0.34		
OH(8-5)R1(3)	1.27644	0.15	0.17	1.27645	0.35	1.27644	0.22
				1.27710	0.05		
				1.27719	0.04		
				1.27720	0.08		
OH(8-5)R1(8)	1.27763	0.27					
OH(8-5)R2(8)	1.27764	0.17		1.27764	0.04		
				1.27764	0.04		
				1.27765	0.06		
				1.27765	0.06		
				1.27770	0.21		
				1.27772	0.23		
OH(8-5)R2(3)	1.27772	0.17	0.24	1.27818	0.06	1.27825	0.24
				1.27825	0.49		
OH(8-5)R1(2)	1.27826	0.13	0.24	1.27826	0.47		
				1.28010	0.10		
				1.28015	0.29		
				1.28016	0.26		
OH(8-5)R2(2)	1.28016	0.05	0.18	1.28017	0.03		
				1.28024	0.08		
				1.28069	0.40		
OH(8-5)R1(1)	1.28070	0.09	0.18	1.28070	0.39	1.28070	0.23
				1.28250	0.05		
				1.28259	0.04		

				1.28283	0.08		
				1.28313	0.07		
				1.28345	0.19		
				1.28346	0.22		
OH(8-5)R2(1)	1.28346	0.04		1.28347	0.04	1.28346	0.08
				1.28347	0.04		
				1.28497	0.08		
				1.28551	0.07		
				1.28575	0.07		
				1.28651	0.08		
				1.28743	0.07		
				1.28805	0.03		
				1.28862	0.08		
				1.28998	0.07		
				1.29034	0.17		
OH(8-5)Q2(1)	1.29036	0.06	0.36	1.29037	0.17		
				1.29038	0.02		
				1.29057	0.94		
OH(8-5)Q1(1)	1.29057	0.01	0.36	1.29058	0.94	1.29057	0.57
				1.29117	0.08		
OH(8-5)Q2(2)	1.29159	0.10	0.14	1.29165	0.07		
				1.29166	0.08		
				1.29209	0.40		
OH(8-5)Q1(2)	1.29212	0.07	0.14	1.29213	0.44	1.29212	0.17
				1.29335	0.07		
				1.29360	0.02		
OH(8-5)Q2(3)	1.29361	0.09	0.07	1.29382	0.06	1.29431	0.09
				1.29428	0.21		
OH(8-5)Q1(3)	1.29432	0.15	0.07	1.29436	0.23		
				1.29500	0.03		
				1.29538	0.08		
				1.29558	0.07		
				1.29591	0.07		
OH(8-5)Q2(4)	1.29642	0.09		1.29644	0.05		
				1.29713	0.09		
OH(8-5)Q1(4)	1.29722	0.26		1.29729	0.12		
				1.29730	0.06		
				1.29759	0.09		
				1.29855	0.31		
				1.29857	0.06		
OH(8-5)P2(2)	1.29857	0.21	0.11	1.29858	0.29	1.29857	0.15
				1.29946	0.08		
				1.29967	0.05		
				1.29968	0.04		
				1.30000	0.04		
OH(8-5)Q2(5)	1.30000	0.02		1.30001	0.03		
				1.30001	0.03		
				1.30019	0.08		
				1.30071	0.03		
OH(8-5)Q1(5)	1.30083	0.41		1.30095	0.06	1.30216	0.32
				1.30131	0.08		
				1.30215	0.77		
OH(8-5)P1(2)	1.30217	0.17	0.50	1.30217	0.77		
				1.30299	0.11		
OH(8-5)Q2(6)	1.30435	0.06		1.30438	0.04		
				1.30496	0.08		
				1.30514	0.03		
				1.30515	0.04		
OH(8-5)Q1(6)	1.30518	0.58		1.30527	0.54		
OH(8-5)P2(3)	1.30528	0.14	0.21	1.30528	0.50	1.30528	0.21
				1.30536	0.03	1.30852	0.39
				1.30646	0.07		
				1.30681	0.05		

				1.30726	0.07		
				1.30741	0.08		
				1.30758	0.07		
				1.30794	0.11		
				1.30824	0.04		
				1.30851	1.13		
OH(8-5)P1(3)	1.30853	0.36	0.57	1.30854	1.11		
				1.30855	0.01		
				1.30858	0.08		
				1.30900	0.08		
				1.30937	0.07		
OH(8-5)Q2(7)	1.30948	0.17		1.30953	0.06		
				1.30955	0.03		
				1.31016	0.06		
				1.31017	0.05		
OH(8-5)Q1(7)	1.31029	0.79		1.31017	0.05		
				1.31053	0.05	1.31278	0.18
				1.31061	0.05		
				1.31169	0.07		
				1.31200	0.10		
				1.31225	0.07		
				1.31248	0.02		
				1.31278	1.07		
OH(8-5)P2(4)	1.31279	0.01	0.25	1.31310	0.08		
				1.31345	0.08		
				1.31360	0.07		
				1.31377	0.07		
OH(8-5)Q2(8)	1.31540	0.32		1.31551	0.05	1.31567	0.19
				1.31562	0.08		
				1.31565	1.13		
OH(8-5)P1(4)	1.31568	0.58	0.18	1.31571	1.10		
				1.31584	0.06		
				1.31607	0.08		
OH(8-5)Q1(8)	1.31618	1.01		1.31632	0.07		
				1.31639	0.07		
				1.31775	0.08		
				1.31791	0.07		
				1.31866	0.08		
				1.31899	0.07		
				1.31993	0.03		
				1.31994	0.03		
				1.32094	0.05		
				1.32108	0.48		
OH(8-5)P2(5)	1.32109	0.12	0.10	1.32109	0.47	1.32110	0.10
				1.32109	0.47		
				1.32169	0.07		
				1.32169	0.02		
				1.32195	0.04		
				1.32195	0.05		
				1.32228	0.04		
				1.32229	0.05		
				1.32230	0.02		
				1.32238	0.09		
				1.32275	0.03		
				1.32322	0.05		
				1.32329	0.06		
				1.32361	0.88		
OH(8-5)P1(5)	1.32365	0.82	0.29	1.32369	0.88	1.32366	0.27
				1.32402	0.07	1.33019	0.01
				1.32407	0.04		
				1.32717	0.06		
				1.32740	0.07		
				1.32898	0.08		

				1.32922	0.08		
				1.32944	0.07		
				1.32947	0.07		
				1.32988	0.05		
				1.33017	0.31		
OH(8-5)P2(6)	1.33020	0.33		1.33021	0.34		
				1.33022	0.03		
				1.33048	0.07		
				1.33066	0.04		
				1.33067	0.05		
				1.33067	0.03		
				1.33241	0.54		
OH(8-5)P1(6)	1.33247	1.11		1.33252	0.57	1.33247	0.04
				1.33253	0.06		
				1.33284	0.07		
				1.33527	0.03		
				1.33531	0.04		
				1.33532	0.06		
				1.33617	0.05		
				1.33714	0.09		
				1.33828	0.07		
				1.33896	0.03		
				1.33994	0.07		
				1.34010	0.22		
OH(8-5)P2(7)	1.34013	0.54		1.34015	0.17	1.34208	0.06
				1.34016	0.04		
				1.34208	0.31		
OH(8-5)P1(7)	1.34216	1.42		1.34223	0.31		
				1.34485	0.03		
				1.34580	0.02		
				1.34580	0.06		
				1.34606	0.08		
				1.50063	0.33		
OH(2-0)P2(7)	1.50067	0.97		1.50072	0.35	1.50067	0.34
OH(10-7)Q2(4)	1.50164	0.18		1.50251	0.51		
OH(2-0)P1(7)	1.50261	1.83		1.50270	0.51	1.50261	0.51
OH(10-7)Q1(4)	1.50272	0.36					
OH(10-7)P2(2)	1.50284	0.25		1.50525	0.98	1.50528	0.99
OH(3-1)Q2(1)	1.50529	0.03	0.87	1.50532	1.01		
				1.50552	0.08		
				1.50553	0.09		
				1.50554	0.16		
				1.50554	6.46		
OH(3-1)Q1(1)	1.50555	0.02	0.87	1.50557	6.44	1.50555	6.45
				1.50557	0.18		
				1.50559	0.08		
				1.50635	0.34		
OH(3-1)Q2(2)	1.50640	0.05		1.50645	0.34	1.50640	0.33
OH(10-7)Q2(5)	1.50683	0.09		1.50685	0.06	1.50689	2.67
				1.50686	2.69		
				1.50687	0.06		
OH(3-1)Q1(2)	1.50690	0.06	0.86	1.50693	0.05		
				1.50694	2.65		
OH(10-7)P1(2)	1.50717	0.20					
OH(10-7)Q1(5)	1.50800	0.57		1.50817	0.15		
OH(3-1)Q2(3)	1.50823	0.04	0.07	1.50828	0.16	1.50882	1.08
				1.50874	1.09		
OH(3-1)Q1(3)	1.50883	0.13	0.07	1.50892	1.07		
				1.51069	0.06		
OH(3-1)Q2(4)	1.51074	0.00		1.51121	0.41		
OH(10-7)P2(3)	1.51123	0.21					
OH(3-1)Q1(4)	1.51137	0.23		1.51153	0.38	1.51137	0.39
OH(10-7)Q2(6)	1.51316	0.02		1.51338	0.12		

OH(2-0)P2(8)	1.51344	1.26		1.51351	0.13		
OH(3-1)Q2(5)	1.51392	0.06		1.51393	0.05		
				1.51393	0.05		
				1.51430	0.14		
OH(10-7)Q1(6)	1.51436	0.85					
OH(3-1)Q1(5)	1.51455	0.34		1.51480	0.13		
				1.51499	0.20		
OH(2-0)P1(8)	1.51510	2.17		1.51521	0.19		
OH(10-7)P1(3)	1.51531	0.39					
OH(3-1)Q2(6)	1.51777	0.14					
OH(3-1)Q1(6)	1.51837	0.47		1.51869	0.04	1.51870	1.98
				1.51870	1.98		
OH(3-1)P2(2)	1.51871	0.26	0.38	1.51873	1.99		
				1.51873	1.99		
				1.51874	0.06		
OH(10-7)Q2(7)	1.52064	0.16					
OH(10-7)P2(4)	1.52080	0.12					
OH(10-7)Q1(7)	1.52185	1.13					
OH(3-1)Q2(7)	1.52228	0.23					
OH(3-1)Q1(7)	1.52285	0.62		1.52407	0.11		
				1.52408	4.65		
				1.52409	0.12		
				1.52409	0.12		
OH(3-1)P1(2)	1.52410	0.33	1.30	1.52410	0.11	1.52410	4.65
				1.52411	4.66		
				1.52412	0.11		
OH(10-7)P1(4)	1.52457	0.67					
OH(3-1)Q2(8)	1.52746	0.35					
OH(3-1)Q1(8)	1.52800	0.78		1.52827	0.06		
				1.52852	0.07		
				1.52877	0.08		
				1.52877	2.92		
				1.52877	2.92		
OH(3-1)P2(3)	1.52878	0.08	0.52	1.52878	2.93	1.52878	2.93
				1.52878	2.93		
				1.52879	0.08		
				1.52879	0.08		
				1.52880	0.04		
OH(10-7)Q2(8)	1.52933	0.37		1.52989	0.10		
				1.52992	0.11		
				1.52995	0.48		
				1.52999	0.37		
				1.53002	0.17		
				1.53007	0.16		
OH(10-7)Q1(8)	1.53051	1.50		1.53108	0.07		
				1.53110	0.06		
OH(10-7)P2(5)	1.53156	0.09		1.53319	0.08		
				1.53320	0.13		
				1.53321	5.90		
				1.53322	0.15		
				1.53323	0.10		
				1.53323	0.07		
OH(3-1)P1(3)	1.53324	0.61	1.50	1.53324	0.08	1.53324	5.91
				1.53325	0.09		
				1.53326	0.13		
				1.53327	5.93		
				1.53328	0.13		
				1.53329	0.08		
				1.53487	0.12		
				1.53490	0.11		
OH(10-7)P1(5)	1.53500	0.99					
OH(4-2)R1(8)	1.53872	0.61					
OH(4-2)R2(8)	1.53916	0.63		1.53952	0.06		

OH(3-1)P2(4)	1.53953	0.15	0.40	1.53953	2.74		
				1.53954	2.74	1.53953	2.73
				1.53955	0.09		
OH(4-2)R1(7)	1.54051	0.64					
OH(4-2)R2(7)	1.54113	0.60		1.54298	0.16		
OH(4-2)R1(6)	1.54302	0.65		1.54305	0.19	1.54321	5.03
				1.54315	0.08		
				1.54316	0.10		
				1.54317	5.03		
				1.54318	0.10		
				1.54319	0.07		
OH(3-1)P1(4)	1.54322	0.92	1.00	1.54324	0.08		
				1.54325	0.13		
				1.54326	5.03		
				1.54327	0.11		
OH(10-7)P2(6)	1.54351	0.29		1.54385	0.12		
OH(4-2)R2(6)	1.54388	0.54		1.54391	0.11		
				1.54618	0.44		
OH(4-2)R1(5)	1.54621	0.63	0.03	1.54624	0.44	1.54621	0.44
OH(10-7)P1(6)	1.54665	1.39		1.54740	0.28		
OH(4-2)R2(5)	1.54742	0.46	0.03	1.54744	0.31	1.54744	0.31
				1.54882	0.10	1.55008	0.97
				1.54889	0.09		
				1.55006	0.98		
OH(4-2)R1(4)	1.55009	0.58	0.06	1.55011	0.97		
				1.55095	0.05		
				1.55096	1.96		
OH(3-1)P2(5)	1.55098	0.42	0.08	1.55099	0.04	1.55098	1.96
				1.55100	1.96		
				1.55171	0.04		
				1.55177	0.60		
OH(4-2)R2(4)	1.55179	0.33	0.06	1.55180	0.59	1.55179	0.59
				1.55396	0.10		
				1.55397	3.37		
				1.55398	0.08		
OH(3-1)P1(5)	1.55403	1.24	0.30	1.55408	0.08	1.55404	3.35
				1.55410	3.34		
				1.55410	0.05		
				1.55417	0.10		
				1.55427	0.10		
				1.55458	0.04		
				1.55459	1.72		
OH(4-2)R1(3)	1.55461	0.50	0.30	1.55463	0.05	1.55462	1.73
				1.55464	1.74		
OH(10-7)P2(7)	1.55672	0.56		1.55701	1.00		
OH(4-2)R2(3)	1.55702	0.18	0.09	1.55703	1.00	1.55702	1.00
				1.55810	0.04		
OH(10-7)P1(7)	1.55958	1.80		1.55974	2.43		
				1.55975	0.04		
OH(4-2)R1(2)	1.55977	0.58	0.48	1.55977	0.05	1.55977	2.43
				1.55978	2.45		
				1.55979	0.07		
				1.56126	0.06		
				1.56140	0.07		
				1.56310	1.14		
OH(3-1)P2(6)	1.56313	0.71	0.14	1.56316	2.57	1.56313	1.12
				1.56316	2.57		
OH(4-2)R2(2)	1.56316	0.00	0.14	1.56317	1.12	1.56316	2.56
				1.56547	0.05		
				1.56548	2.29		
OH(4-2)R1(1)	1.56549	0.24	0.43	1.56549	0.03	1.56550	2.30
				1.56551	2.31		
				1.56552	0.06		

				1.56561	0.05		
				1.56562	1.83		
				1.56563	0.05		
OH(3-1)P1(6)	1.56570	1.58	0.43	1.56577	0.03	1.56570	1.81
				1.56578	1.82		
				1.57024	1.11		
OH(4-2)R2(1)	1.57025	0.18	0.20	1.57026	1.14	1.57025	1.12
OH(10-7)P2(8)	1.57121	0.86					
OH(10-7)P1(8)	1.57383	2.25		1.57598	0.54		
OH(3-1)P2(7)	1.57603	1.01		1.57608	0.54	1.57603	0.53
				1.57812	0.83		
OH(3-1)P1(7)	1.57821	1.94	0.03	1.57831	0.82	1.57821	0.82
				1.58300	0.76		
OH(4-2)Q2(1)	1.58303	0.04	0.80	1.58307	0.74	1.58303	0.75
				1.58330	0.09	1.58332	4.89
				1.58331	0.17		
				1.58332	4.91		
				1.58333	0.18		
OH(4-2)Q1(1)	1.58333	0.02	0.80	1.58334	4.87		
				1.58335	0.14		
				1.58336	0.07		
				1.58419	0.23		
OH(4-2)Q2(2)	1.58425	0.06	0.80	1.58431	0.26	1.58481	2.08
				1.58476	0.05		
				1.58477	2.09		
OH(4-2)Q1(2)	1.58482	0.13	0.06	1.58483	0.05		
				1.58485	2.07		
				1.58619	0.12		
OH(4-2)Q2(3)	1.58625	0.05	0.05	1.58631	0.12		
				1.58684	0.87		
OH(4-2)Q1(3)	1.58693	0.15	0.05	1.58702	0.86	1.58693	0.87
OH(4-2)Q2(4)	1.58900	0.01	0.02	1.58957	0.33		
				1.58965	0.19		
OH(3-1)P2(8)	1.58971	1.32	0.02				
OH(4-2)Q1(4)	1.58973	0.25	0.02	1.58978	0.21	1.58973	0.33
				1.58989	0.32		
				1.59148	0.32		
OH(3-1)P1(8)	1.59159	2.31		1.59171	0.31	1.59159	0.31
OH(4-2)Q2(5)	1.59250	0.06		1.59296	0.11		
OH(4-2)Q1(5)	1.59322	0.38		1.59348	0.11		
OH(4-2)Q2(6)	1.59672	0.14		1.59725	1.55		
OH(4-2)P2(2)	1.59726	0.28	0.46	1.59727	1.56	1.59726	1.55
OH(4-2)Q1(6)	1.59742	0.53					
OH(4-2)Q2(7)	1.60168	0.25					
OH(4-2)Q1(7)	1.60235	0.69		1.60305	0.07	1.60308	3.67
				1.60307	3.69		
				1.60308	0.11		
				1.60308	0.10		
OH(4-2)P1(2)	1.60309	0.14	1.60	1.60309	0.10		
				1.60310	3.68		
				1.60429	0.07		
				1.60429	0.07		
				1.60572	0.09		
				1.60598	0.10		
OH(4-2)Q2(8)	1.60738	0.38					
OH(4-2)P2(3)	1.60797	0.11	0.60	1.60797	2.32	1.60798	2.31
				1.60798	2.31		
				1.60799	0.04		
OH(4-2)Q1(8)	1.60801	0.88		1.61186	0.06		
				1.61281	0.08		
				1.61282	0.15		
				1.61283	4.75		
				1.61284	0.10		

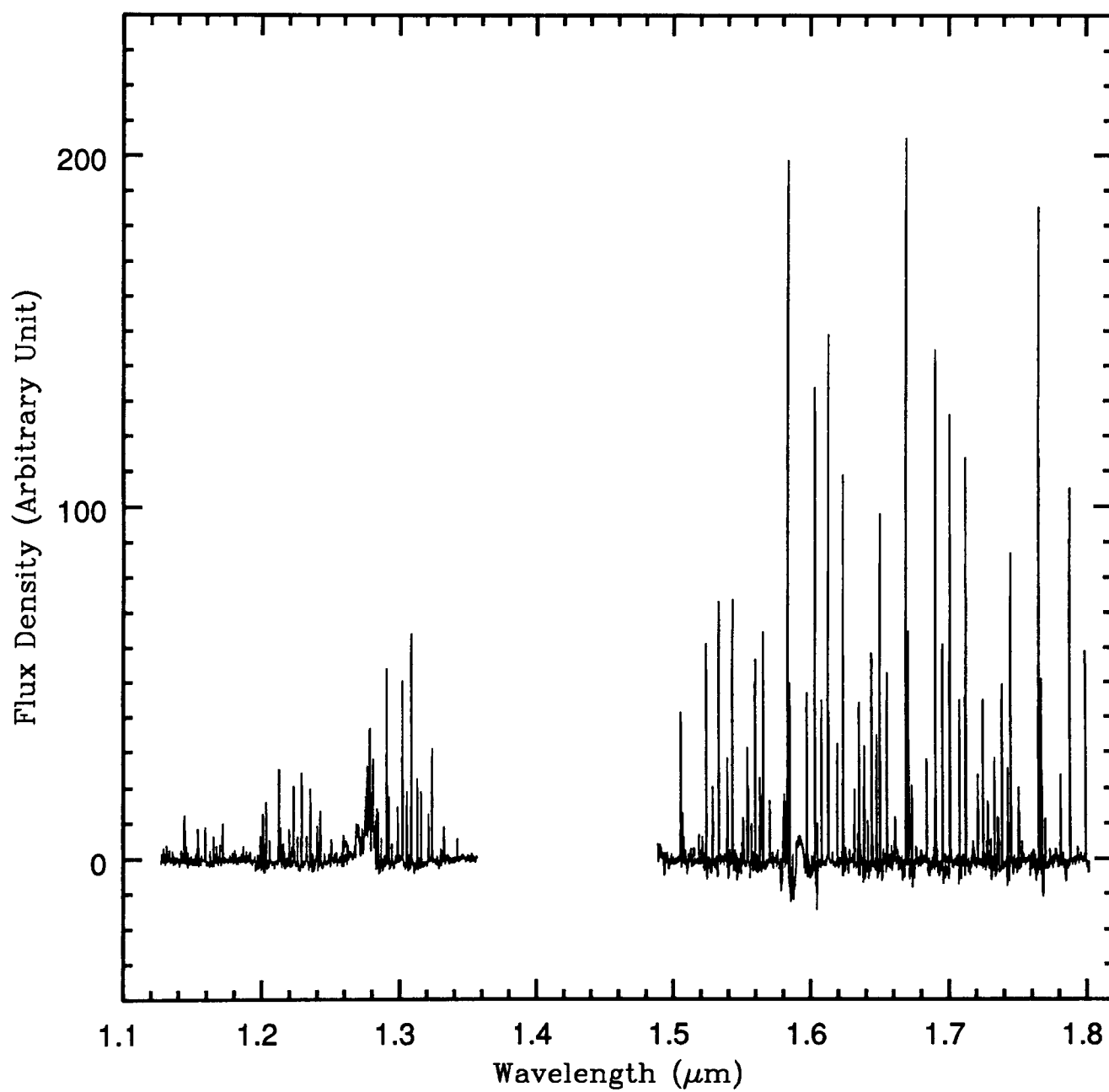
OH(4-2)P1(3)	1.61286	0.63	1.70	1.61285	0.07		
				1.61287	0.08	1.61286	4.74
				1.61288	0.13		
				1.61289	4.74		
				1.61290	0.14		
				1.61292	0.08		
				1.61594	0.06		
				1.61597	0.09		
				1.61944	0.06		
				1.61945	2.19		
				1.61945	2.19		
OH(4-2)P2(4)	1.61946	0.14	0.56	1.61947	2.16	1.61947	2.16
				1.61948	0.07		
OH(5-3)R1(8)	1.62297	0.56					
OH(5-3)R2(8)	1.62344	0.65		1.62346	0.05		
				1.62347	0.05		
				1.62348	0.12		
				1.62349	4.13		
				1.62350	0.11		
OH(4-2)P1(4)	1.62354	0.96	1.40	1.62357	0.10	1.62354	4.11
				1.62359	4.10		
				1.62360	0.09		
OH(5-3)R1(7)	1.62461	0.61		1.62464	0.04		
OH(5-3)R2(7)	1.62527	0.63		1.62700	0.12		
OH(5-3)R1(6)	1.62703	0.63	0.02	1.62706	0.13		
				1.62794	0.08		
OH(5-3)R2(6)	1.62797	0.57	0.02	1.62800	0.08		
				1.63020	0.29		
OH(5-3)R1(5)	1.63023	0.62	0.12	1.63026	0.29		
				1.63075	0.08		
				1.63082	0.07		
				1.63153	0.19		
OH(5-3)R2(5)	1.63155	0.48	0.12	1.63157	0.18		
				1.63169	0.04		
				1.63169	1.64		
OH(4-2)P2(5)	1.63172	0.42	0.12	1.63173	0.05	1.63172	1.64
				1.63174	1.64		
				1.63397	0.02		
				1.63415	0.60		
OH(5-3)R1(4)	1.63418	0.58	0.27	1.63420	0.61	1.63418	0.60
				1.63505	0.08		
				1.63506	2.82		
OH(4-2)P1(5)	1.63513	1.31	0.28	1.63519	0.09	1.63513	2.83
				1.63520	2.83		
				1.63521	0.07		
				1.63602	0.37		
OH(5-3)R2(4)	1.63604	0.36	0.27	1.63606	0.39	1.63604	0.38
				1.63638	0.09		
				1.63649	0.08		
				1.63881	0.04		
				1.63882	1.07		
OH(5-3)R1(3)	1.63885	0.50	0.28	1.63887	1.06	1.63885	1.06
				1.64146	0.63		
				1.64146	0.63		
OH(5-3)R2(3)	1.64147	0.20	0.09	1.64148	0.62	1.64147	0.62
				1.64404	0.06		
				1.64419	0.03		
				1.64420	1.42		
OH(5-3)R1(2)	1.64421	0.38	0.35	1.64422	0.05	1.64421	1.43
				1.64423	1.45		
				1.64471	0.05		
				1.64472	0.99		
OH(4-2)P2(6)	1.64476	0.73	0.35	1.64480	0.98	1.64476	0.98

				1.64755	0.03	1.64764	1.58
				1.64756	1.58		
OH(4-2)P1(6)	1.64765	1.68	0.22	1.64772	0.05		
				1.64773	1.57		
OH(5-3)R2(2)	1.64790	0.01	0.22	1.64791	1.53	1.64790	1.55
				1.64791	1.53	1.65023	1.35
				1.65021	0.04		
				1.65022	1.34		
OH(5-3)R1(1)	1.65024	0.24	0.76	1.65025	1.35		
				1.65537	0.66		
OH(5-3)R2(1)	1.65538	0.18	0.26	1.65539	0.66	1.65539	0.65
				1.65858	0.49		
OH(4-2)P2(7)	1.65863	1.05	0.03	1.65868	0.49	1.65863	0.49
				1.66100	0.76		
OH(4-2)P1(7)	1.66110	2.06	0.07	1.66121	0.74	1.66110	0.75
				1.66888	0.43		
OH(5-3)Q2(1)	1.66892	0.05	1.00	1.66896	0.44	1.66892	0.44
				1.66921	0.07	1.66921	2.88
				1.66923	2.88		
				1.66924	0.18		
OH(5-3)Q1(1)	1.66924	0.02	1.00	1.66925	2.88		
				1.67020	0.16		
OH(5-3)Q2(2)	1.67026	0.08	1.00	1.67032	0.16		
				1.67083	0.04		
				1.67084	1.24		
OH(5-3)Q1(2)	1.67088	0.08	0.10	1.67091	0.04	1.67088	1.22
				1.67092	1.23		
				1.67241	0.06		
OH(5-3)Q2(3)	1.67247	0.07	0.08	1.67254	0.08		
				1.67316	0.53		
OH(5-3)Q1(3)	1.67325	0.16	0.08	1.67330	0.20	1.67325	0.53
				1.67334	0.54		
OH(4-2)P2(8)	1.67337	1.39	0.03	1.67344	0.20		
				1.67538	0.30		
OH(4-2)P1(8)	1.67551	2.47					
OH(5-3)Q2(4)	1.67552	0.03	0.02	1.67563	0.31		
				1.67563	0.31		
				1.67619	0.21		
OH(5-3)Q1(4)	1.67636	0.28	0.02	1.67652	0.22	1.67636	0.21
OH(5-3)Q2(5)	1.67940	0.04		1.67997	0.08		
OH(5-3)Q1(5)	1.68024	0.42		1.68050	0.07		
				1.68403	0.90		
				1.68403	0.90		
				1.68404	0.04		
OH(5-3)P2(2)	1.68405	0.31	0.42	1.68405	0.04	1.68405	0.90
				1.68406	0.90		
OH(5-3)Q2(6)	1.68409	0.14					
OH(5-3)Q1(6)	1.68491	0.59		1.68891	0.09		
				1.68909	0.09		
				1.68909	0.09		
OH(5-3)Q2(7)	1.68960	0.26		1.69034	0.07		
				1.69035	2.16		
OH(5-3)P1(2)	1.69037	0.35	1.80			1.69037	2.15
OH(5-3)Q1(7)	1.69038	0.78		1.69039	2.15		
				1.69074	0.10		
				1.69103	0.09		
				1.69550	1.37		
				1.69550	1.37		
OH(5-3)P2(3)	1.69551	0.14	0.62	1.69551	1.34	1.69551	1.35
OH(5-3)Q2(8)	1.69593	0.39					
OH(5-3)Q1(8)	1.69668	1.00		1.70083	0.08		
				1.70084	2.80		
				1.70085	0.09		

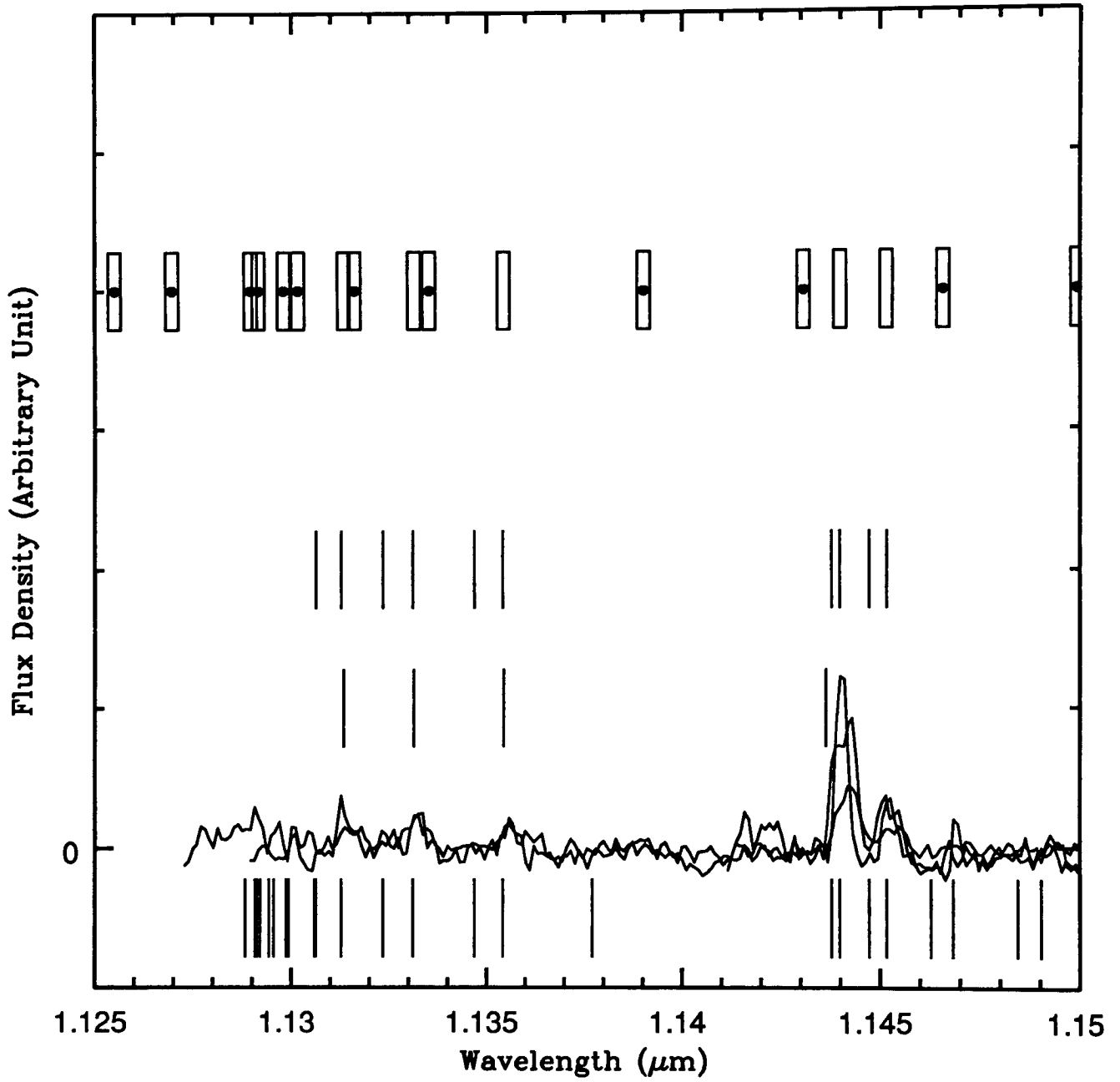
OH(5-3)P1(3)	1.70087	0.66	1.60	1.70090	0.11	1.70088	2.80
				1 70091	2.80		
				1.70570	0.06		
OH(5-3)P2(4)	1.70783	0.12	0.50	1.70783	1.35	1.70783	1.35
				1.70783	1.35		
				1.70784	1.36		
				1.71230	0.08		
				1.71232	2.53		
OH(5-3)P1(4)	1.71236	1.01	1.20	1.71240	0.09	1.71236	2.51
				1.71242	2.51		
				1 71243	0.08		
OH(6-4)R1(8)	1.71753	0.48					
OH(6-4)R2(8)	1.71802	0.53					
OH(6-4)R1(7)	1.71891	0.57					
OH(6-4)R2(7)	1.71962	0.53		1.72100	0.04		
				1.72101	1.00		
OH(5-3)P2(5)	1.72103	0.41	0.10	1.72105	1.01	1.72104	1.00
				1.72114	0.09		
OH(6-4)R1(6)	1.72117	0.60	0.08	1.72120	0.08		
				1.72217	0.06		
OH(6-4)R2(6)	1.72220	0.49	0.08	1.72428	0.20		
OH(6-4)R1(5)	1.72431	0.64	0.18	1.72433	0.20		
				1.72478	0.07		
				1.72479	1.76		
OH(5-3)P1(5)	1.72486	1.39	0.20	1 72492	0.06	1.72486	1.77
				1.72493	1.77		
				1.72573	0.13		
OH(6-4)R2(5)	1.72576	0.41	0.18	1.72578	0.13		
				1.72578	0.13		
				1.72746	0.05		
				1.72826	0.40		
OH(6-4)R1(4)	1.72829	0.59	0.07	1.72832	0.42	1.72829	0.41
				1.73032	0.26		
OH(6-4)R2(4)	1.73034	0.31	0.02	1.73036	0.24		
				1.73306	0.70		
OH(6-4)R1(3)	1.73308	0.48	0.20	1.73310	0.03	1.73309	0.69
				1.73311	0.68		
				1.73508	0.63		
OH(5-3)P2(6)	1.73511	0.73	0 09	1.73515	0.62	1.73511	0.62
				1.73596	0.40		
OH(6-4)R2(3)	1.73597	0.15	0.08	1.73598	0.39	1.73597	0.39
				1.73828	0.03		
				1.73829	1.01		
OH(5-3)P1(6)	1 73838	1.79	0.33	1.73846	0.04	1.73838	1.01
				1.73847	1.01		
				1.73865	0.95		
OH(6-4)R1(2)	1.73867	0.38	0.33	1.73869	0.92	1.73867	0.93
				1.74269	0.04		
				1.74269	0.04		
OH(6-4)R2(2)	1.74270	0.01	0.17	1.74270	0.96	1.74270	0.94
				1.74270	0.96		
				1.74497	0.03		
				1.74499	0.83		
OH(6-4)R1(1)	1.74499	0.25	0.44	1.74500	0.06	1.74499	0.83
				1.74501	0.84		
				1 75007	0.32		
OH(5-3)P2(7)	1.75012	1.08	0.09	1.75018	0.34	1.75013	0.34
				1.75058	0.41		
OH(6-4)R2(1)	1.75059	0.22	0.09	1.75060	0.40	1.75060	0.41
				1.75283	0.50		
OH(5-3)P1(7)	1.75294	2.21	0.05	1.75305	0.51	1.75294	0.51
				1.76495	0.27		
OH(6-4)Q2(1)	1.76498	0.02	0.40	1.76502	0.28		

				1.76530	0.03		
				1.76531	1.82		
OH(6-4)Q1(1)	1.76532	0.03	0.40	1.76532	0.08	1.76532	1.82
				1.76533	1.82		
				1.76602	0.14		
OH(5-3)P2(8)	1.76610	1.45		1.76617	0.13		
				1.76642	0.09		
OH(6-4)Q2(2)	1.76649	0.05	0.40	1.76655	0.09		
				1.76714	0.79		
OH(6-4)Q1(2)	1.76718	0.08	0.14	1.76721	0.03	1.76718	0.79
				1.76722	0.79		
				1.76842	0.21		
OH(5-3)P1(8)	1.76855	2.66	0.14	1.76868	0.21		
				1.76889	0.05		
OH(6-4)Q2(3)	1.76896	0.06	0.04	1.76975	0.35		
OH(6-4)Q1(3)	1.76984	0.19	0.04	1.76994	0.36	1.76984	0.35
OH(6-4)Q2(4)	1.77238	0.02	0.01	1.77317	0.13		
OH(6-4)Q1(4)	1.77334	0.33	0.01	1.77352	0.14		
OH(6-4)Q2(5)	1.77674	0.10		1.77744	0.06		
OH(6-4)Q1(5)	1.77771	0.46		1.78113	0.56	1.78114	0.55
OH(6-4)P2(2)	1.78115	0.30		1.78117	0.56		
OH(6-4)Q2(6)	1.78201	0.24					
OH(6-4)Q1(6)	1.78297	0.63		1.78299	0.05		
				1.78317	0.07		
				1.78509	0.08		
				1.78540	0.08		
				1.78800	0.04		
				1.78801	1.34		
OH(6-4)P1(2)	1.78802	0.37	0.76	1.78803	0.07	1.78803	1.34
				1.78805	1.35		
OH(6-4)Q2(7)	1.78822	0.38					
OH(6-4)Q1(7)	1.78915	0.89		1.79347	0.81		
				1.79347	0.81		
OH(6-4)P2(3)	1.79347	0.13		1.79348	0.79	1.79348	0.80
OH(6-4)Q2(8)	1.79536	0.55					
OH(6-4)Q1(8)	1.79625	1.12		1.79935	0.07		
				1.79936	1.80		
OH(6-4)P1(3)	1.79939	0.68	1.20	1.79942	0.07	1.79940	1.80
				1.79943	1.81		

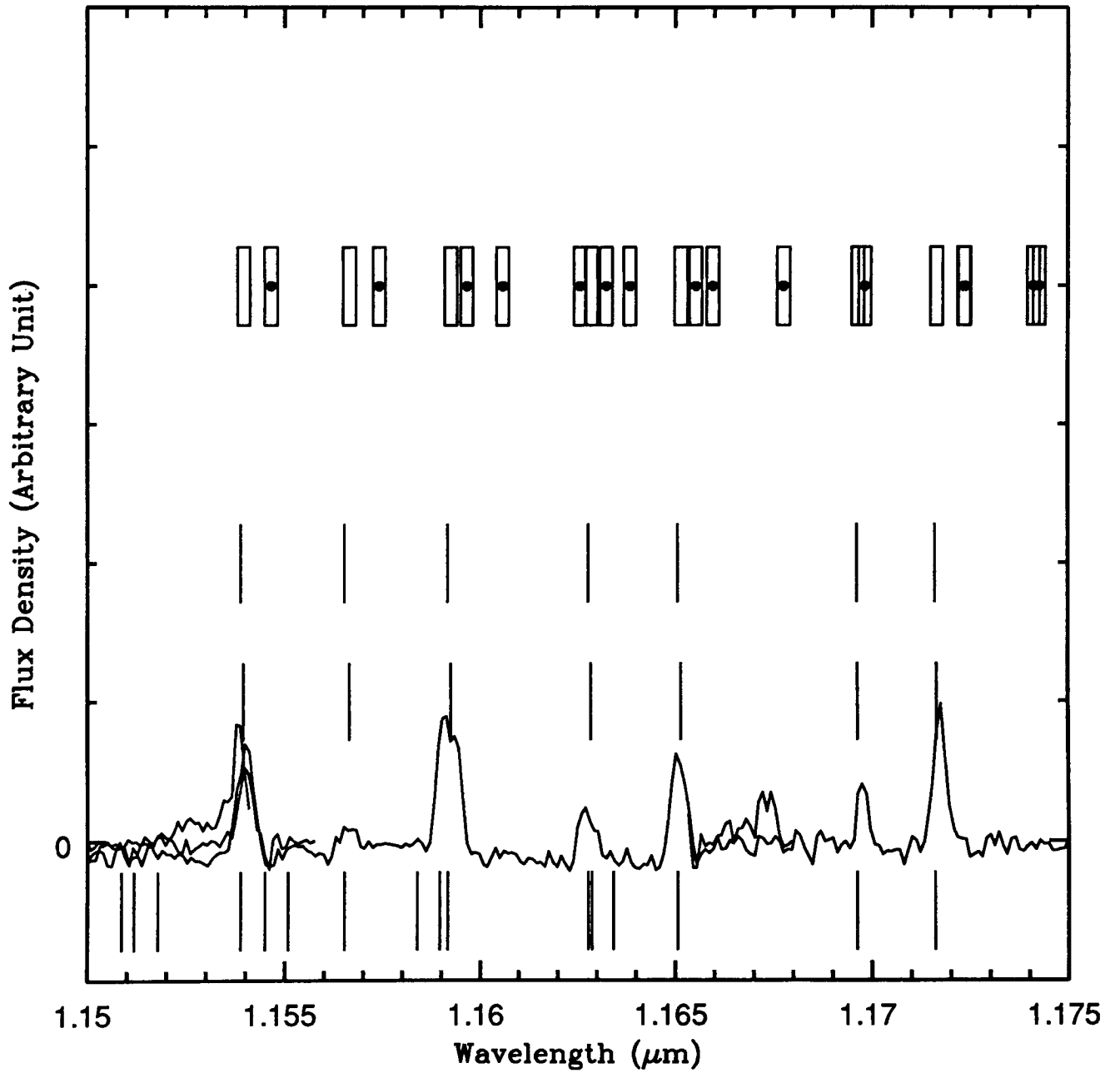
OH airglow emission



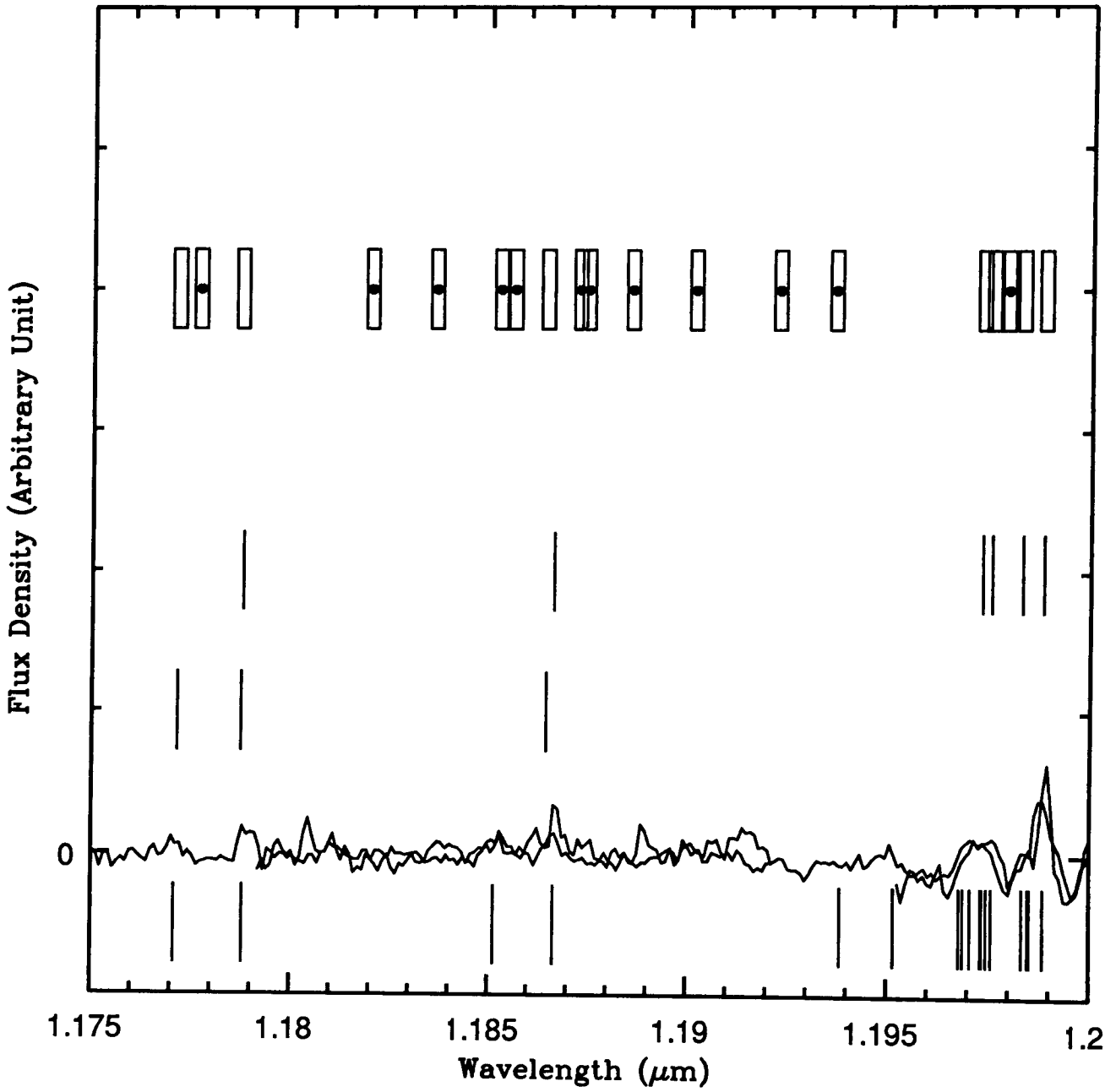
OH airglow emission



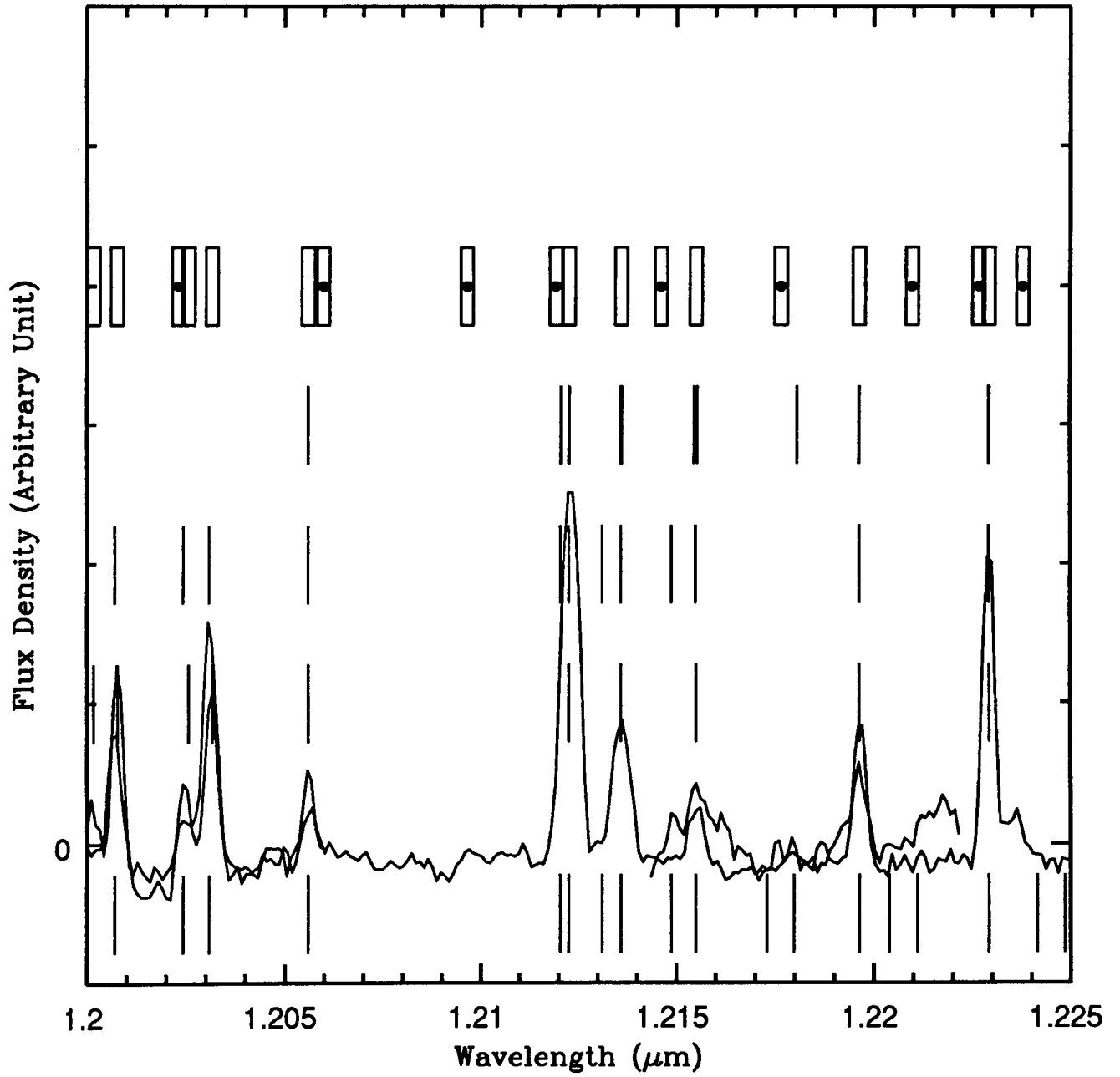
OH airglow emission



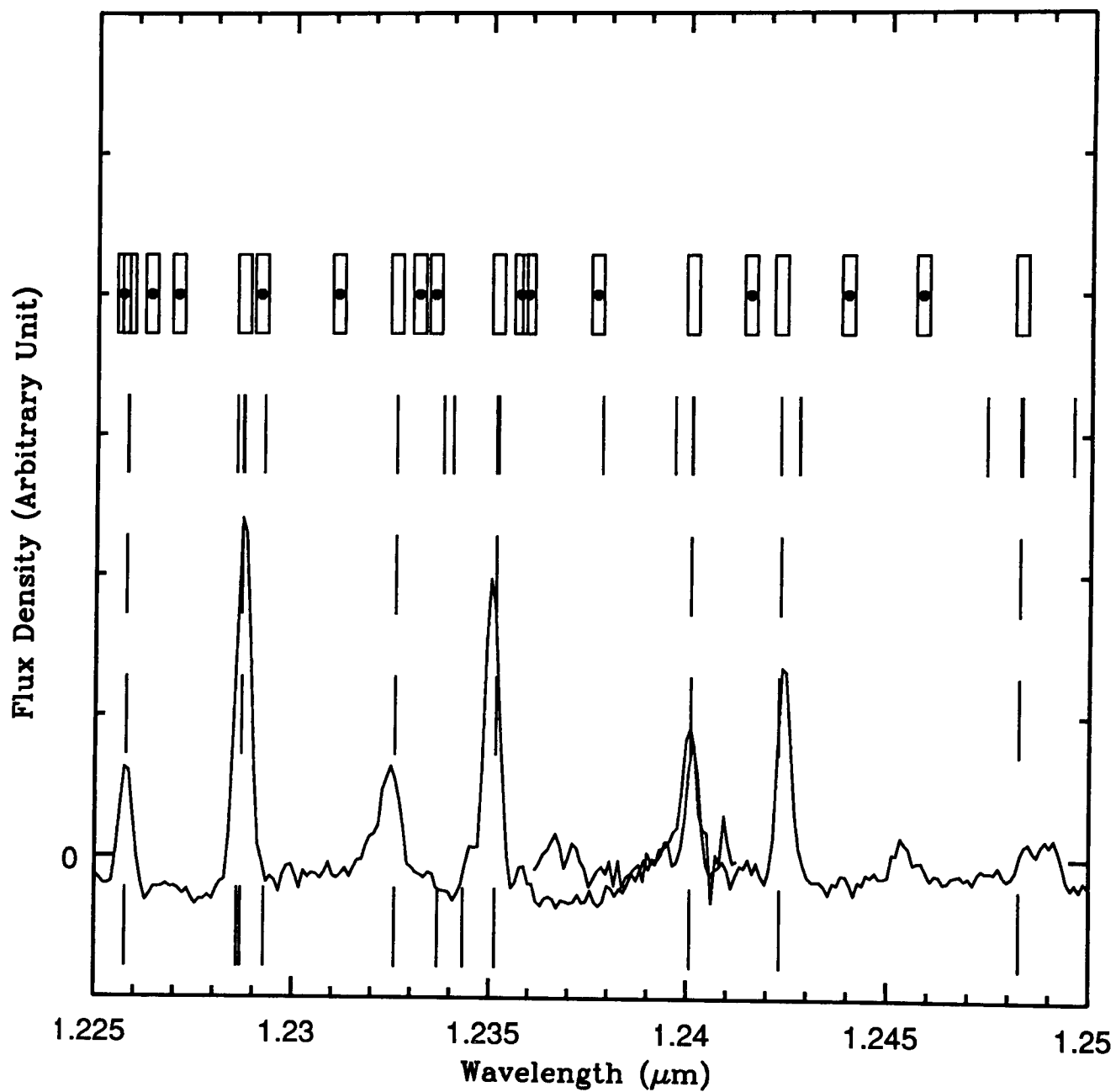
OH airglow emission



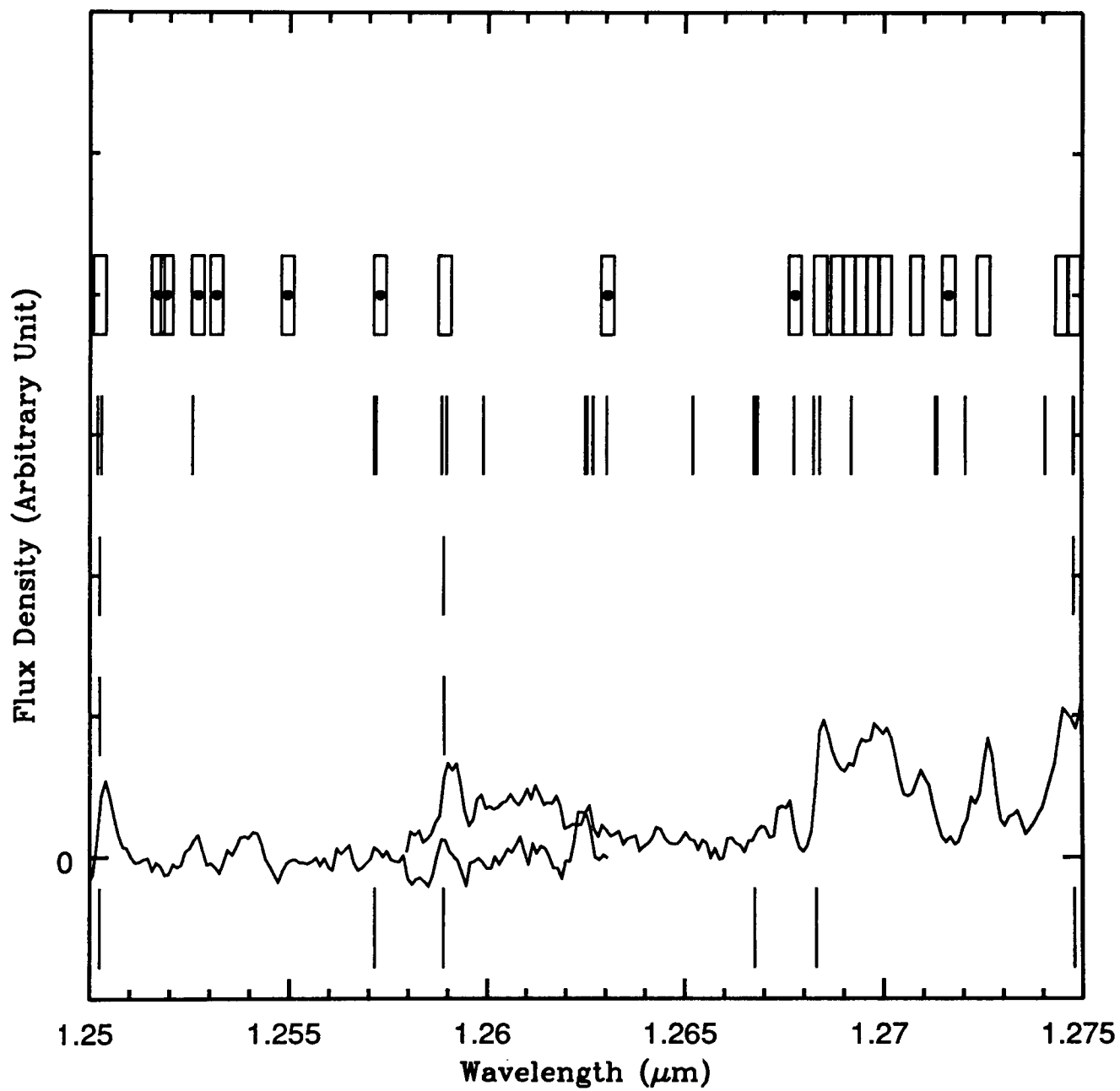
OH airglow emission



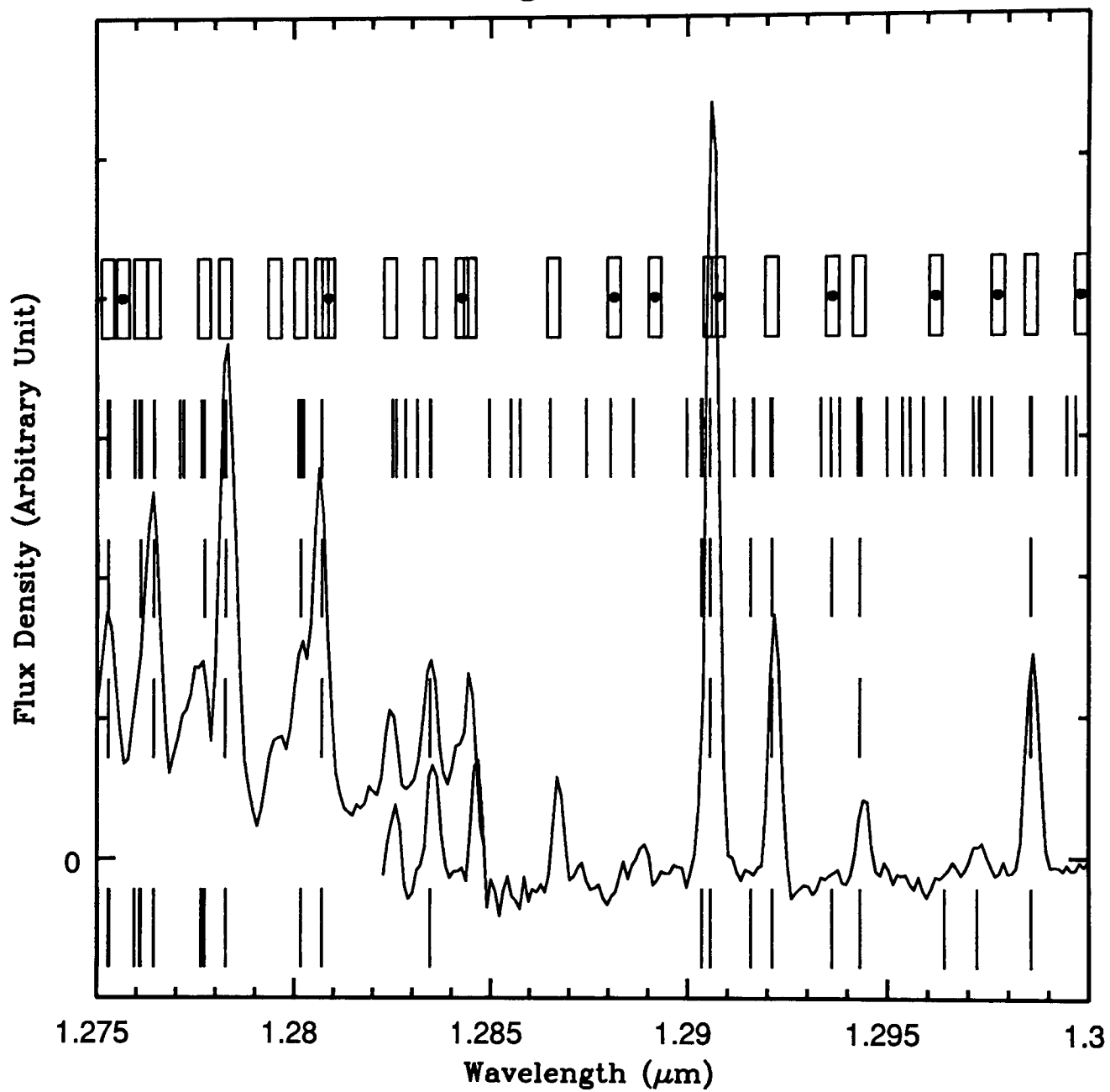
OH airglow emission



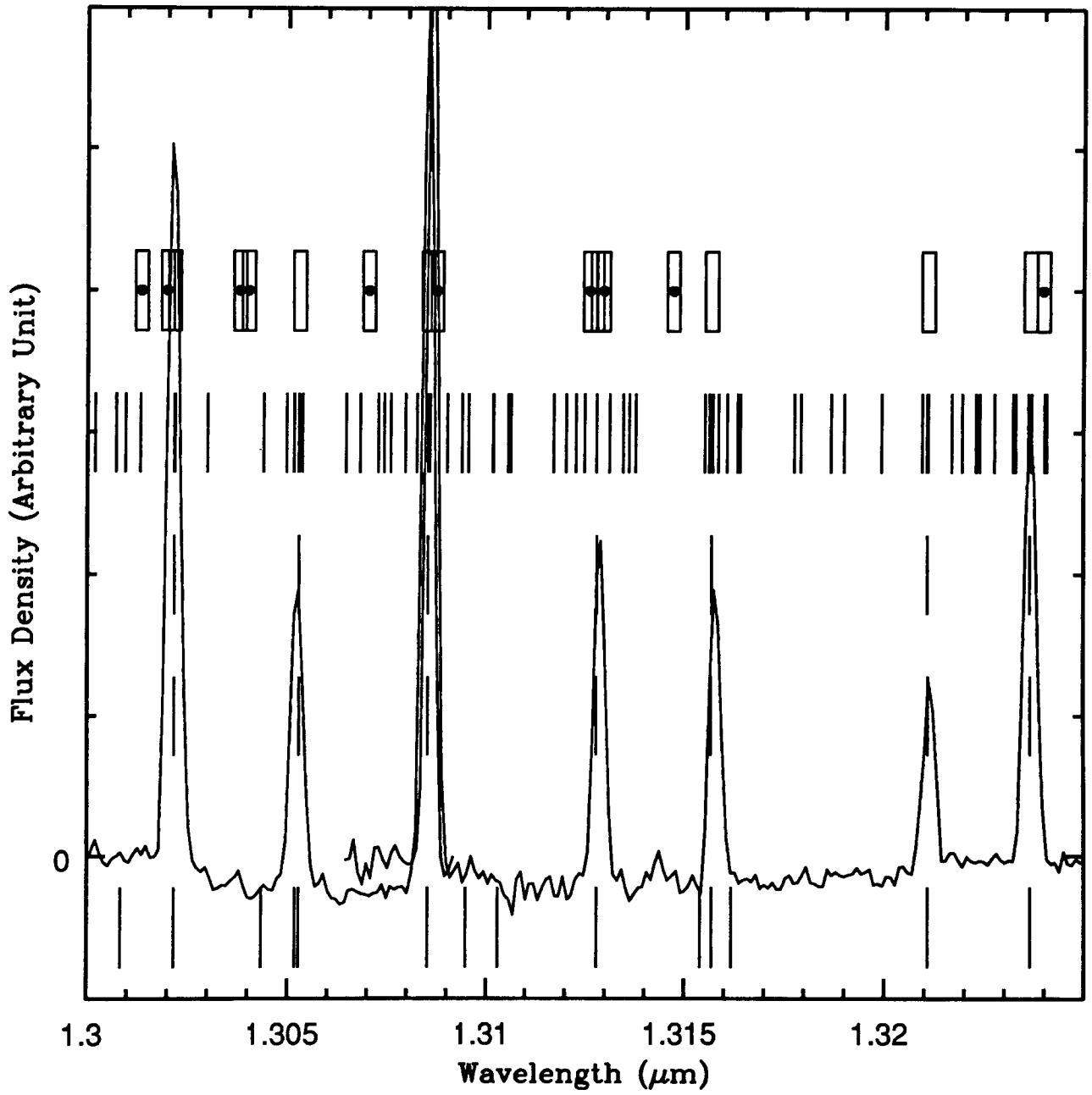
OH airglow emission



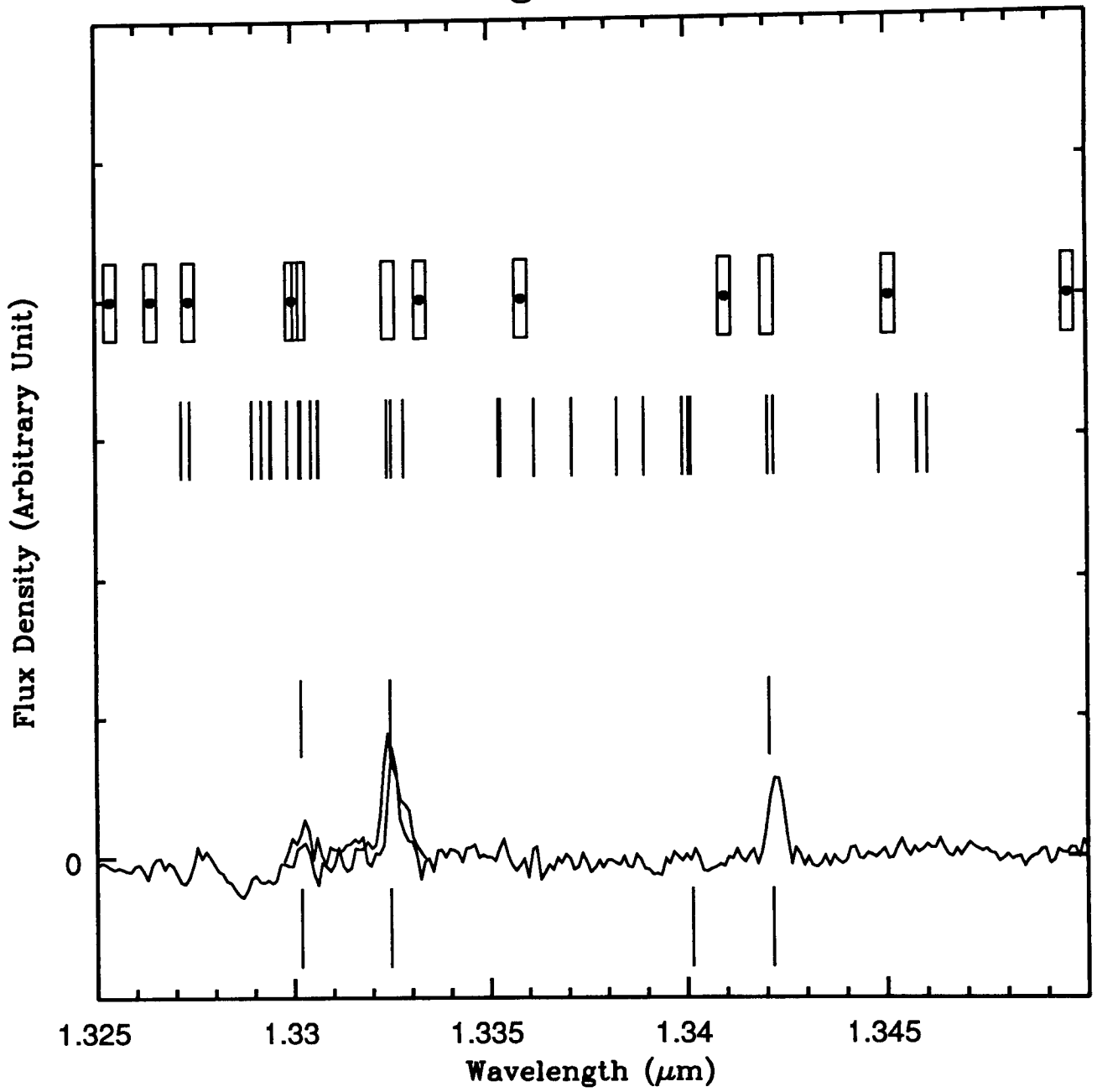
OH airglow emission



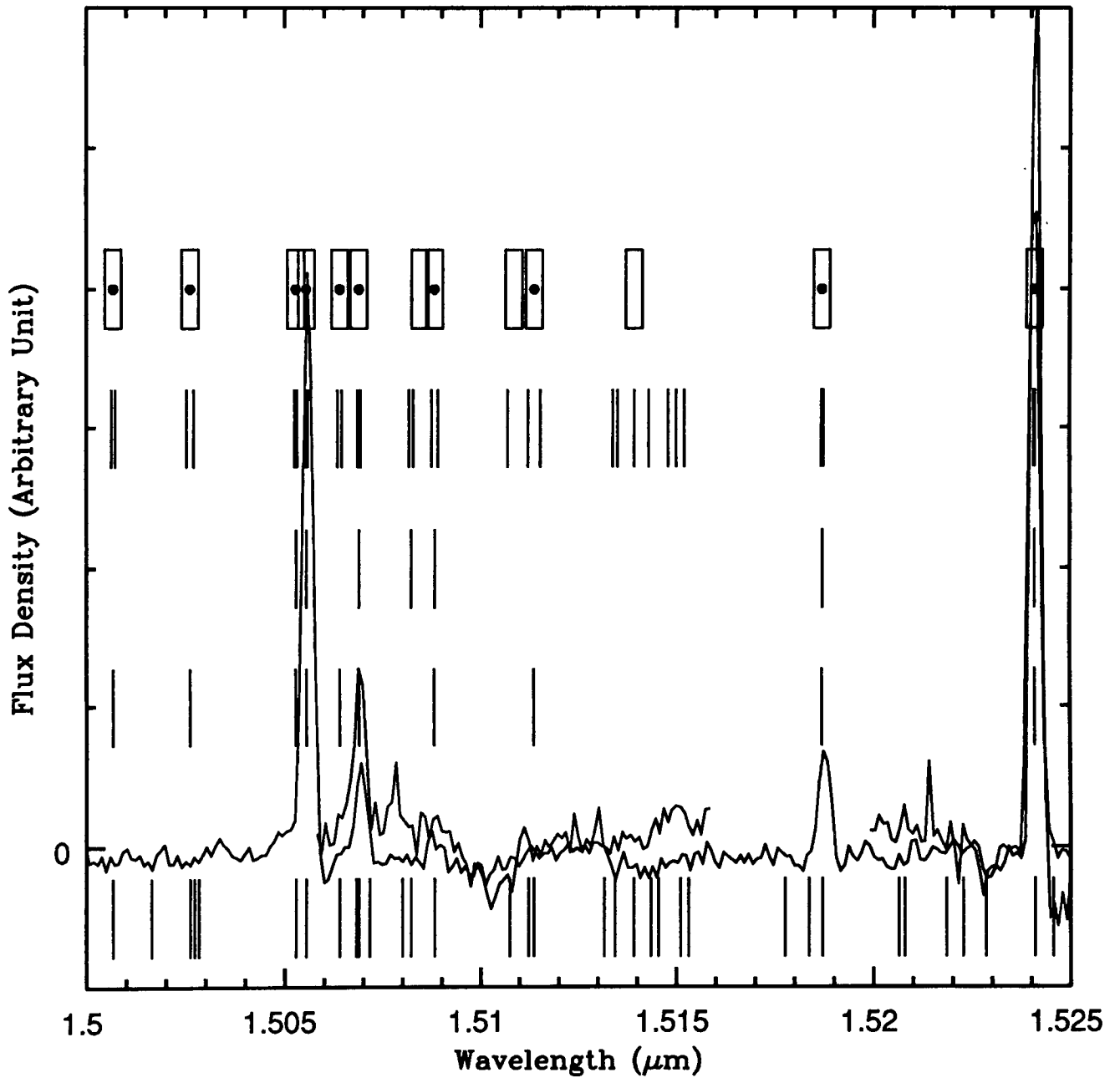
OH airglow emission



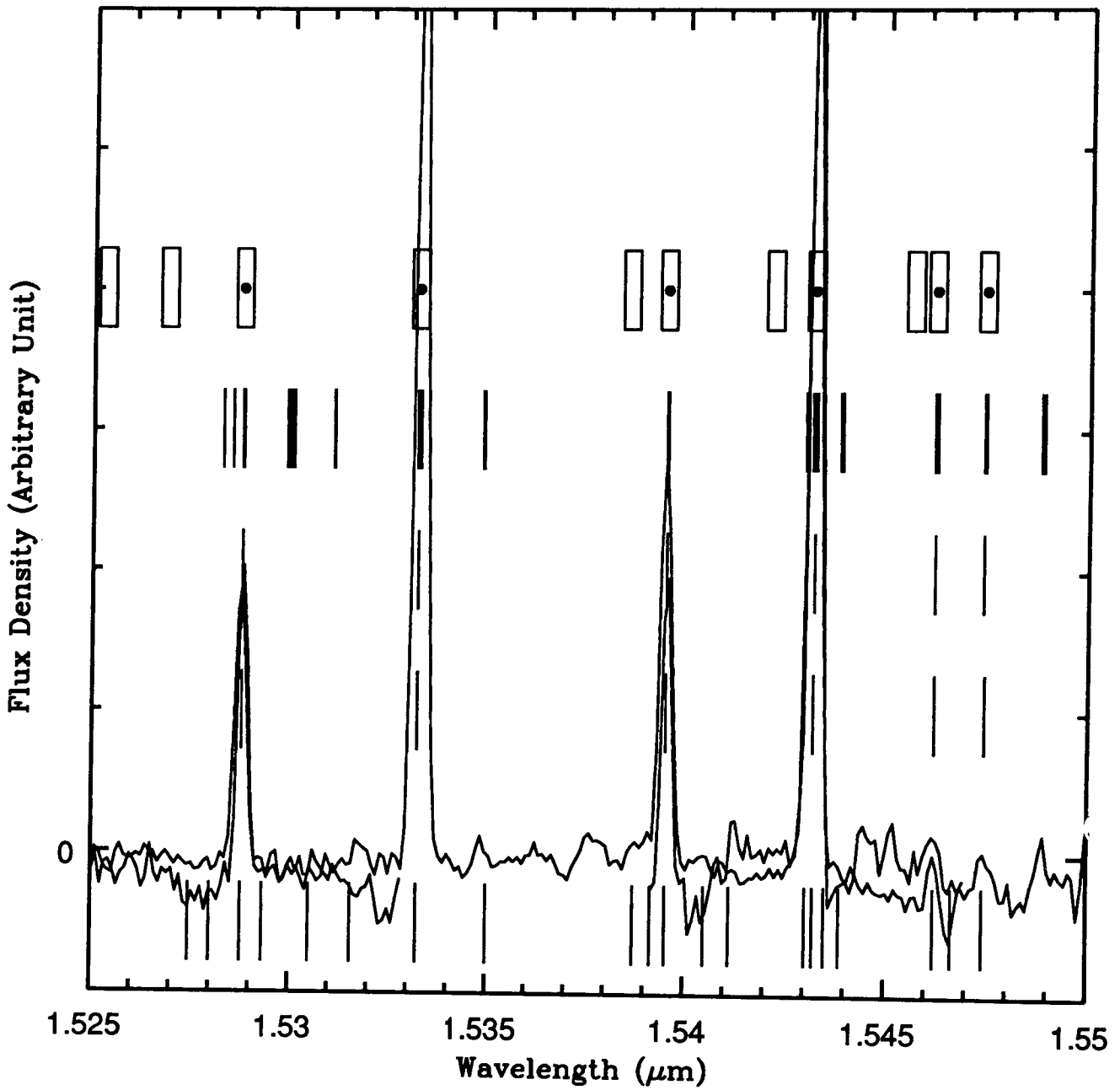
OH airglow emission



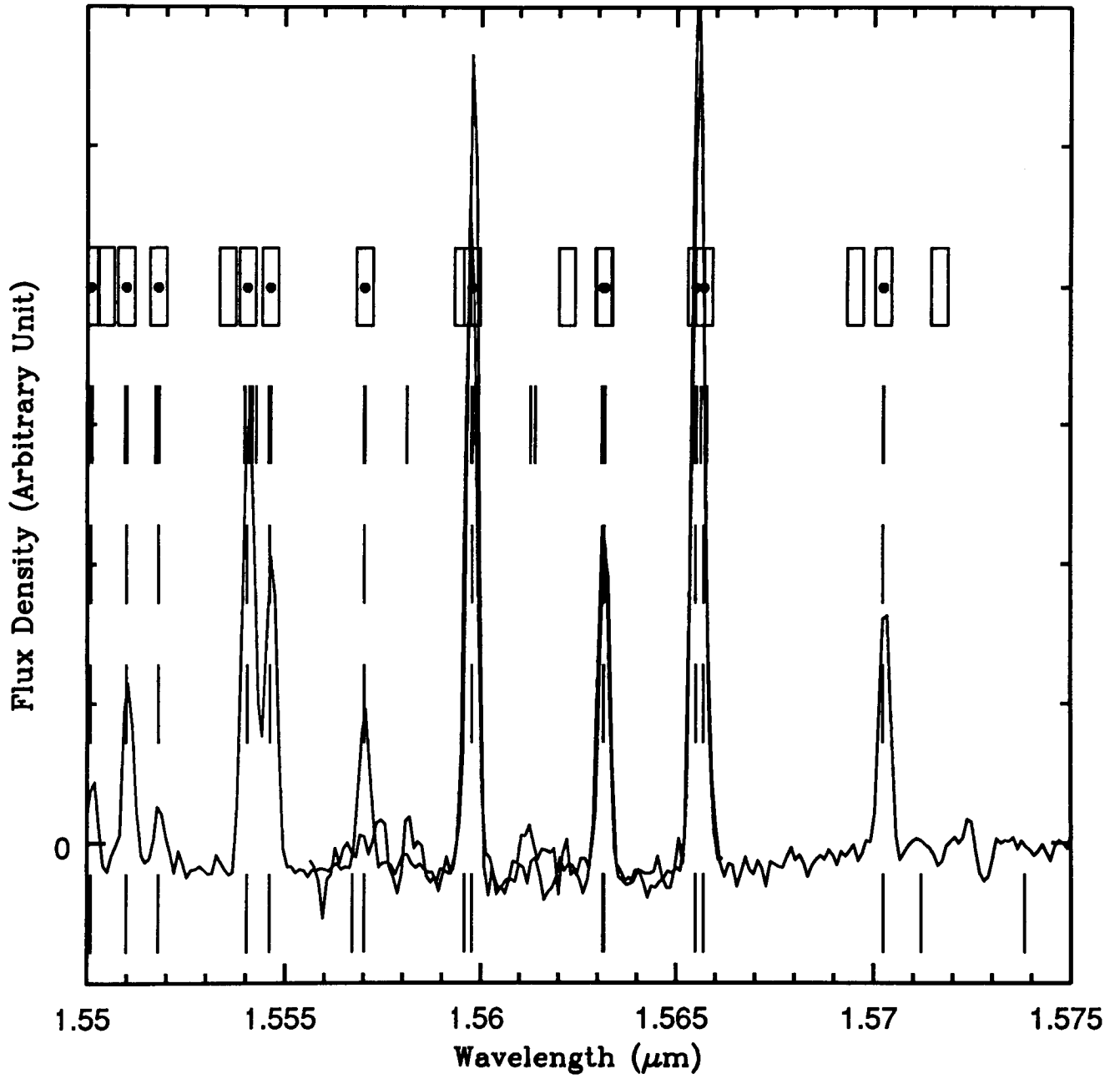
OH airglow emission



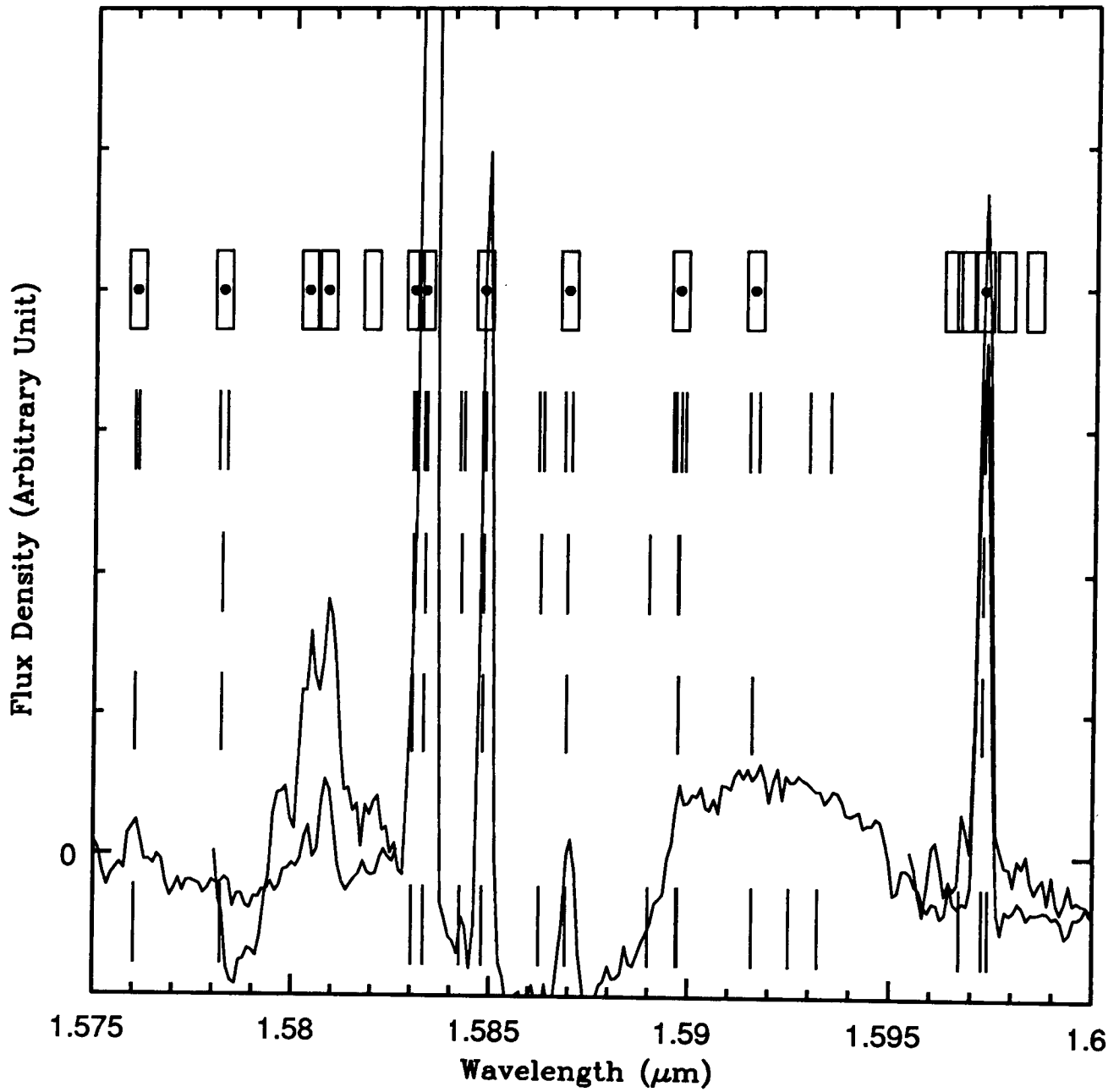
OH airglow emission



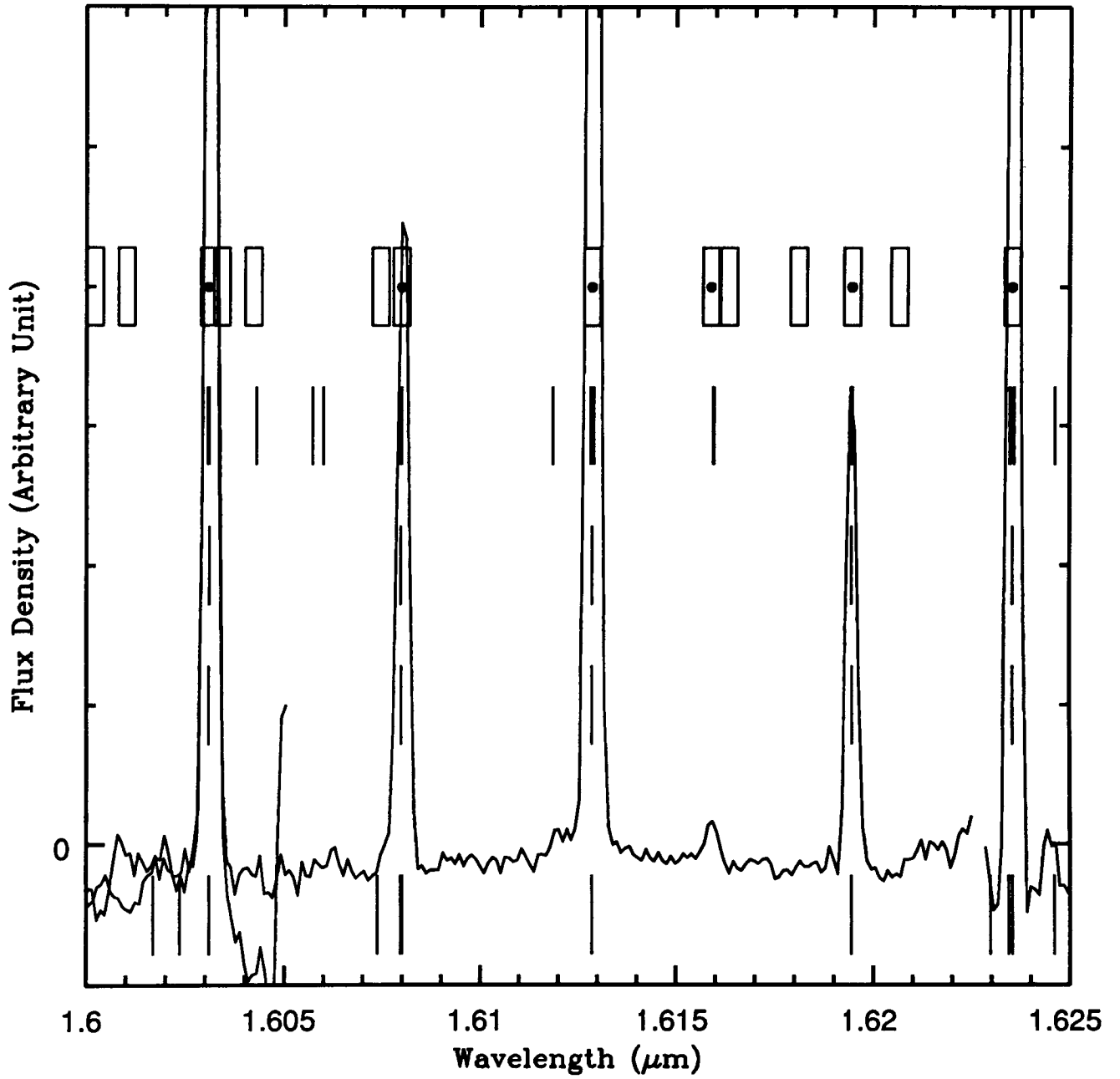
OH airglow emission



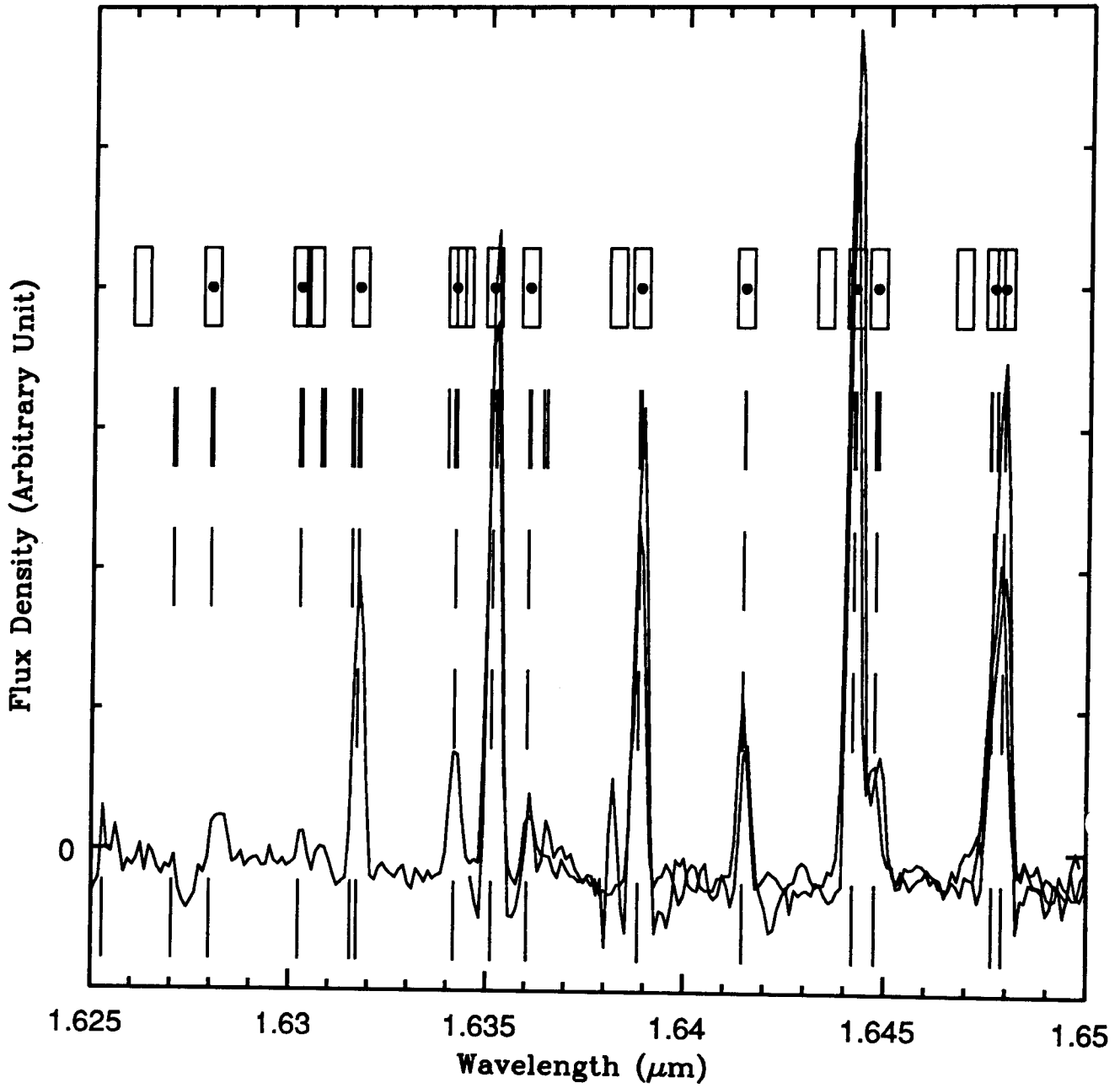
OH airglow emission



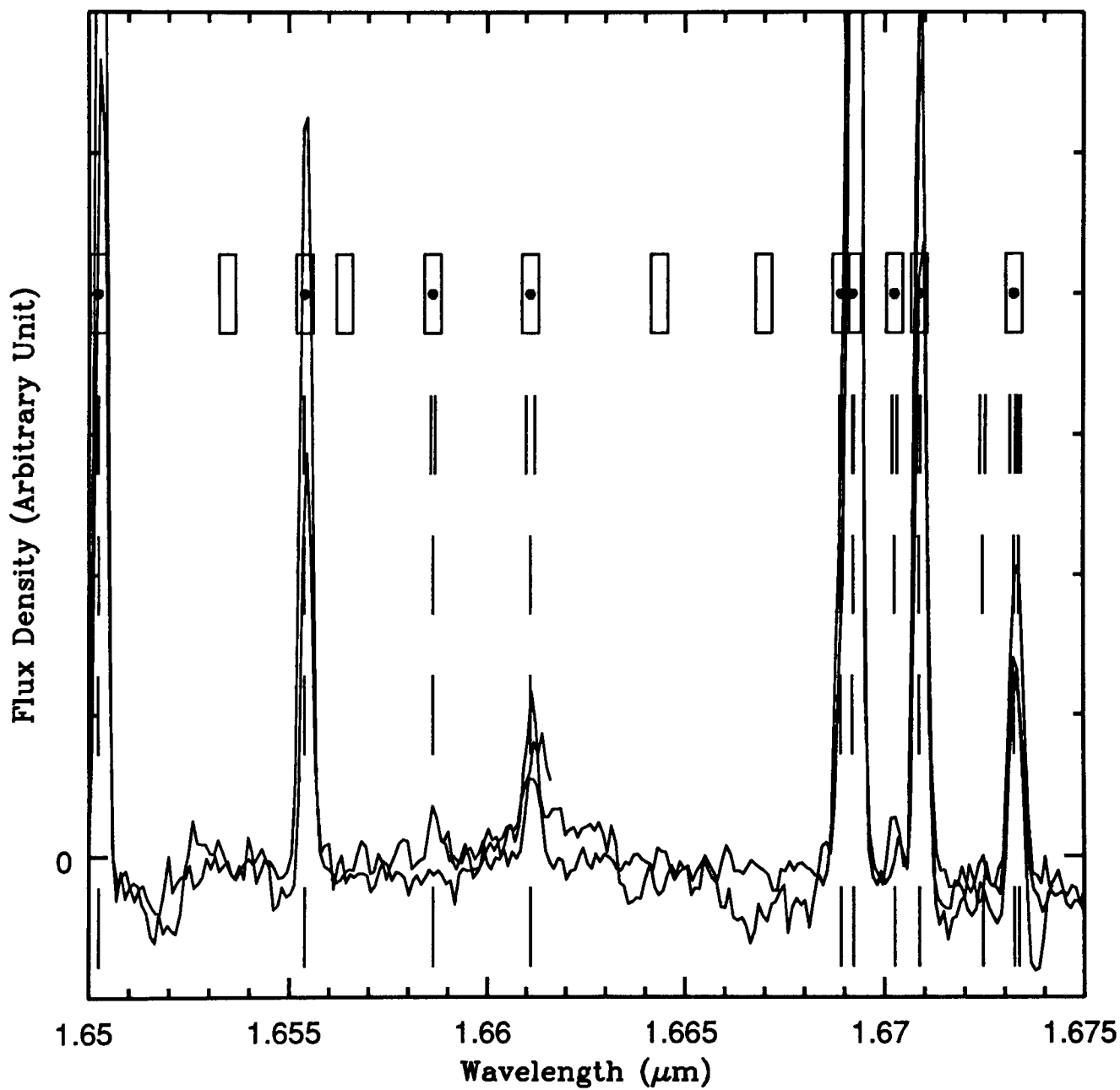
OH airglow emission



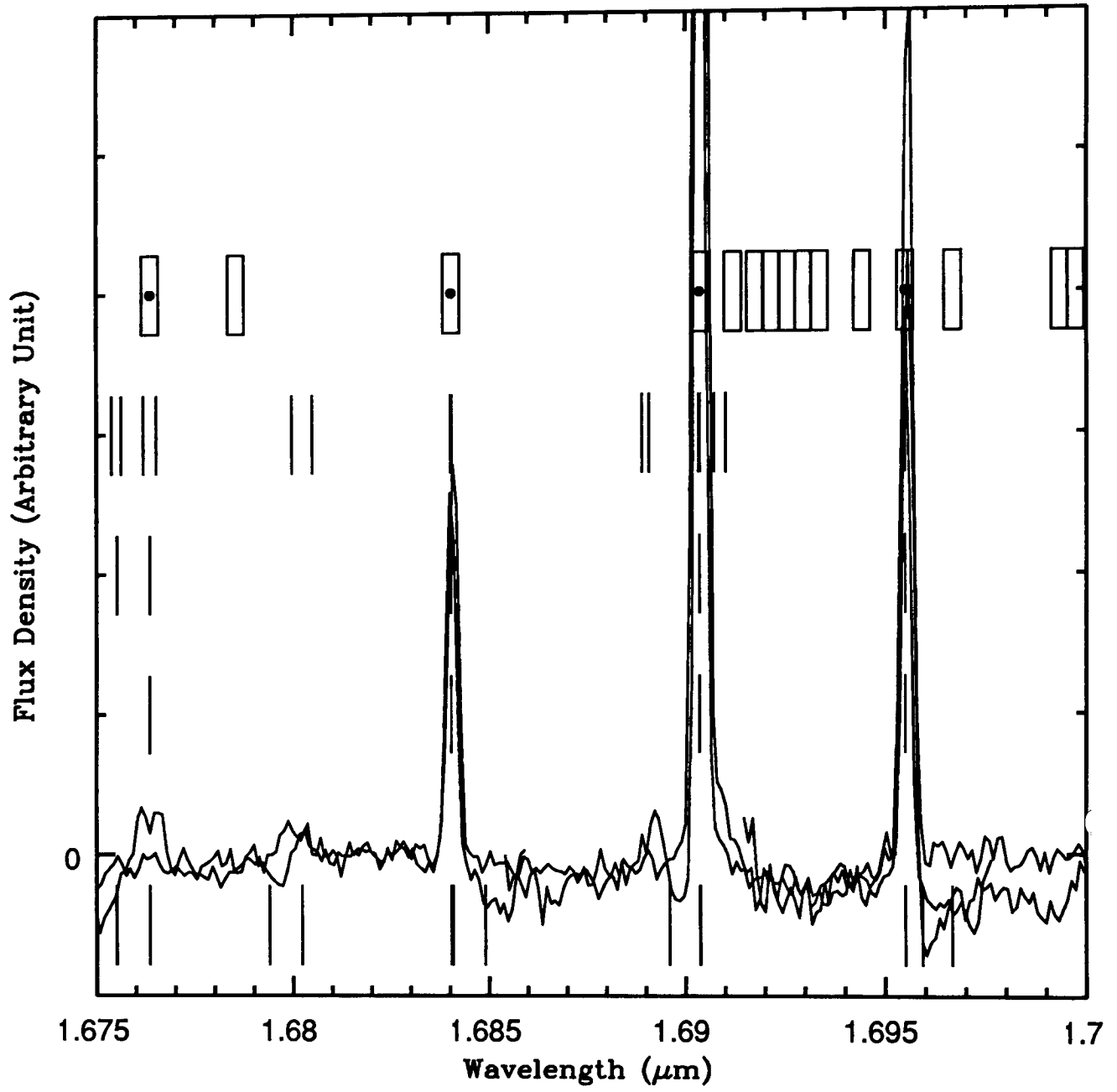
OH airglow emission



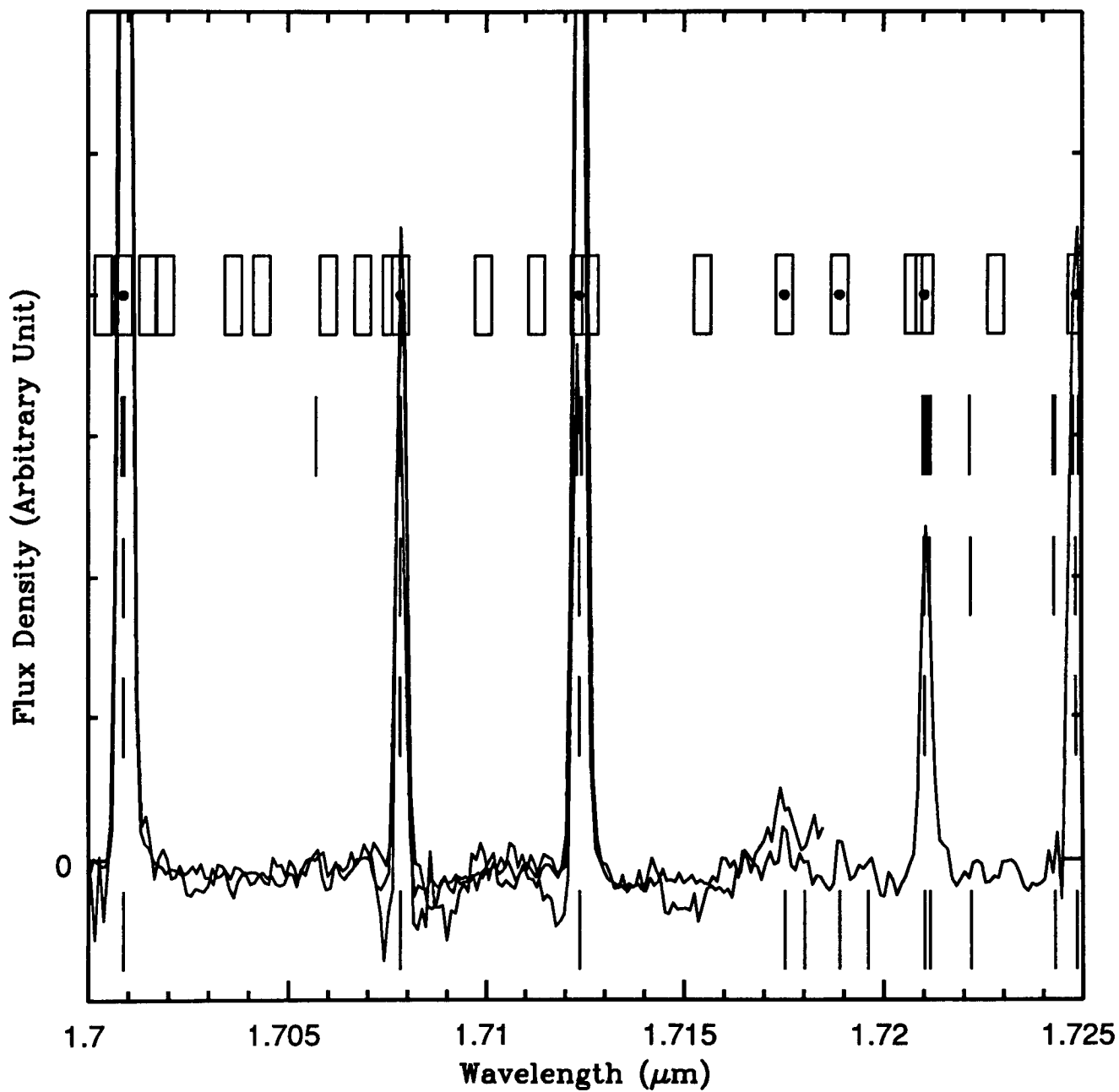
OH airglow emission



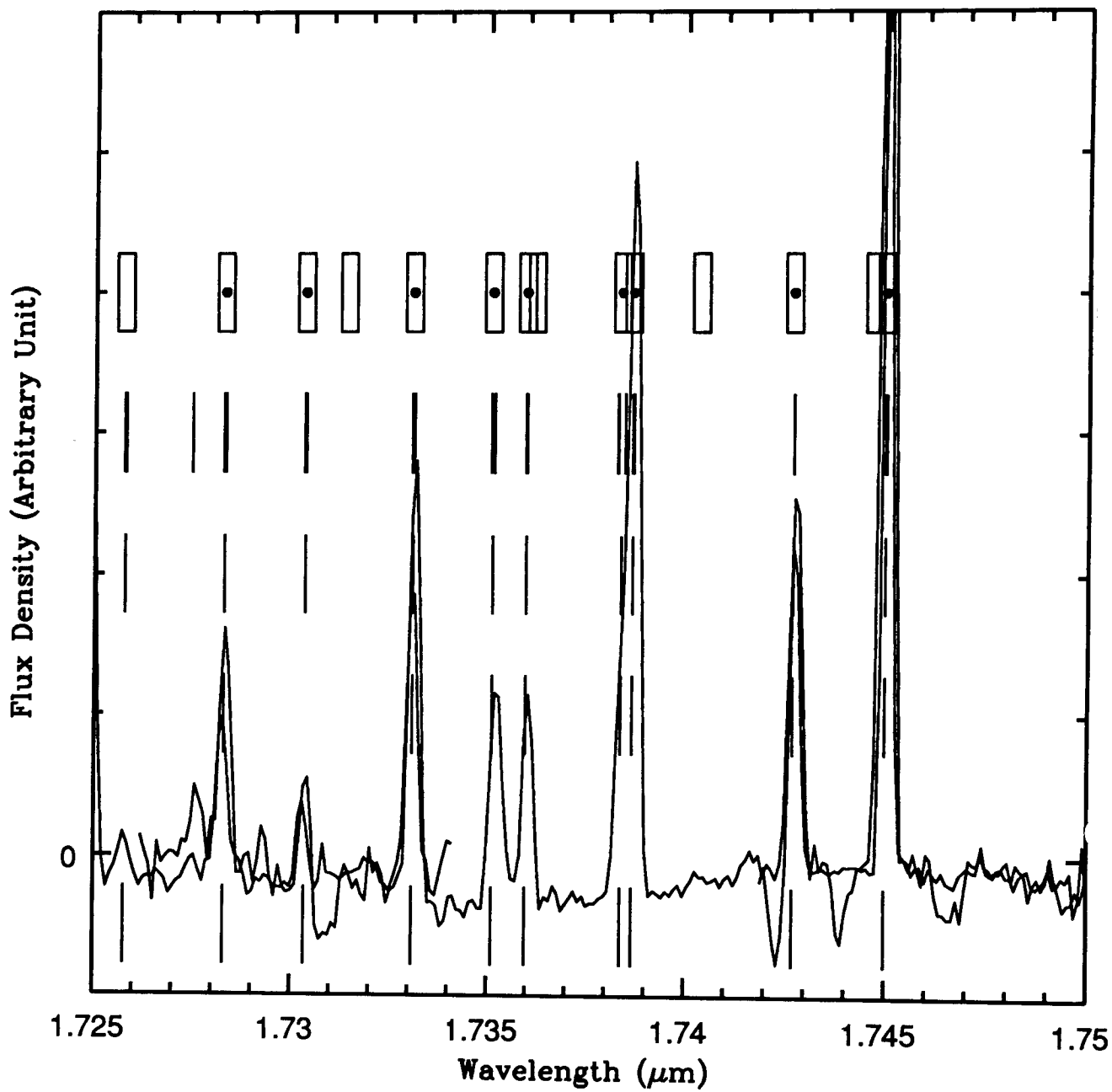
OH airglow emission



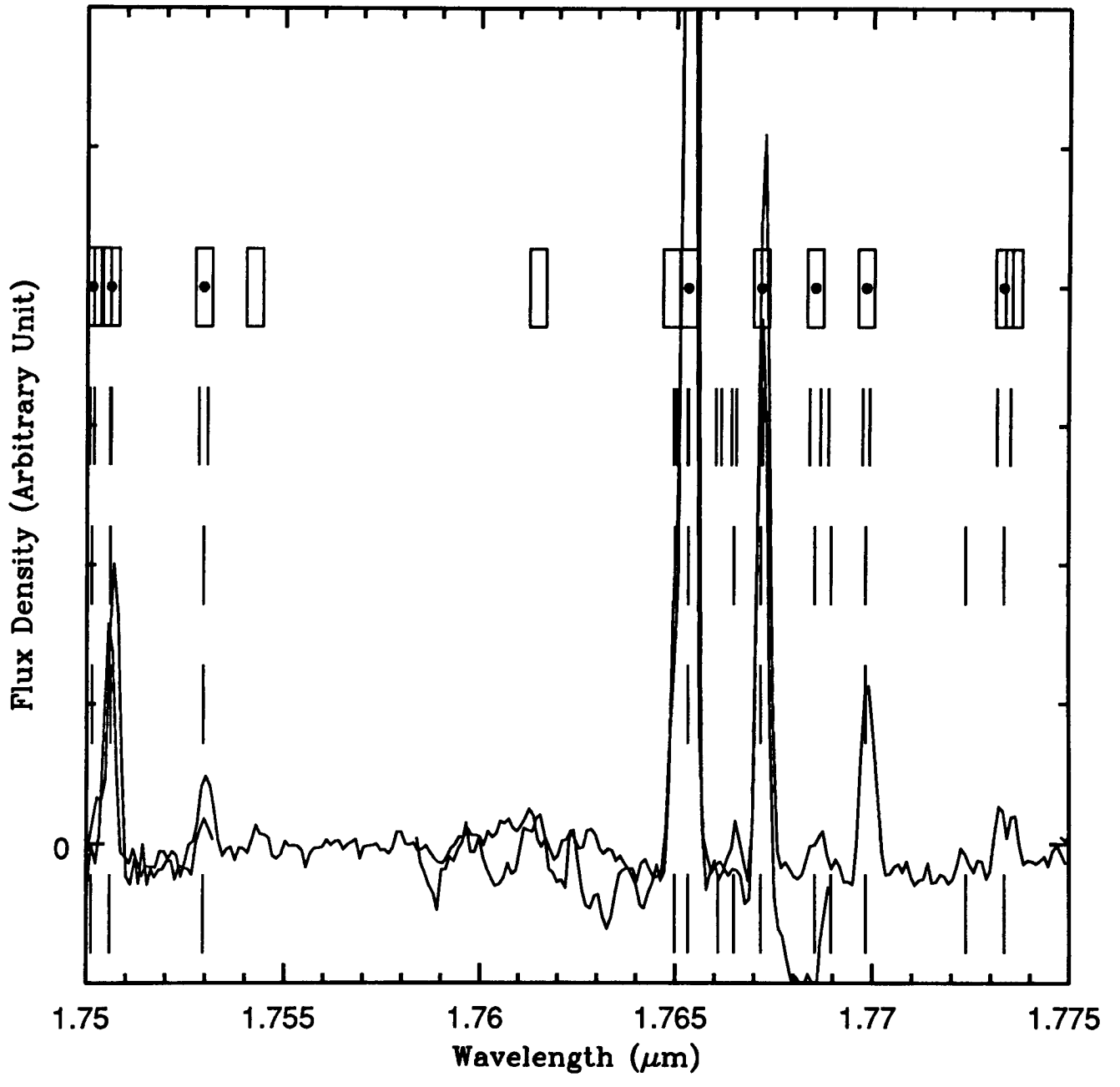
OH airglow emission



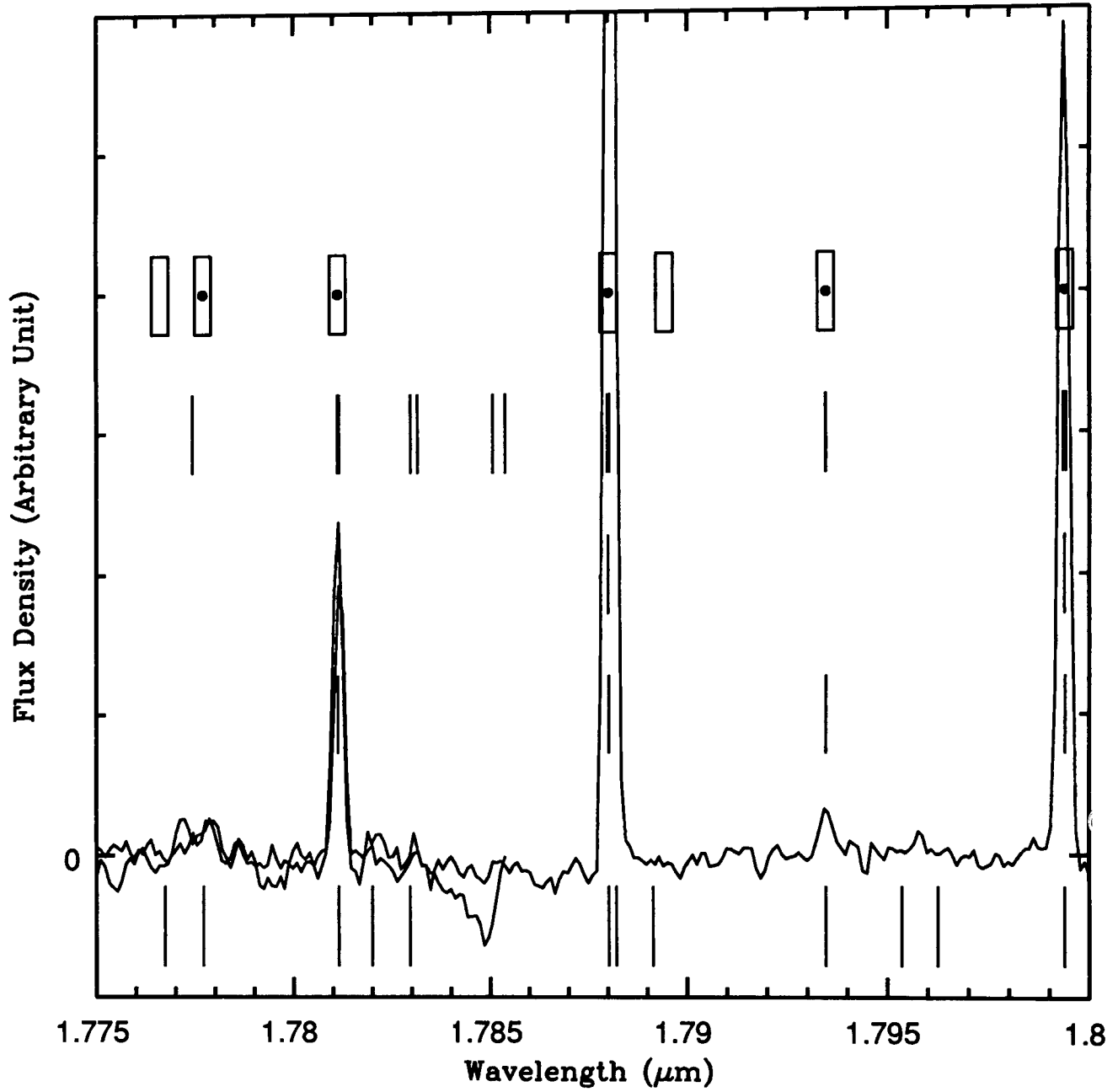
OH airglow emission



OH airglow emission



OH airglow emission



A p p e n d i x C
第一回觀測結果

観測日時 : 1992年11月17日~23日
 観測場所 : ハワイ・マウナケア山
 観測装置 : UH88 (カセグレイン焦点) + OHS + NICMOS3-camera

観測概要 : 今回の観測は全く天候に恵まれず、7日の観測期間の内晴れたのは最終日の1日だけで、あとは殆どドームすら開けられない状態が続いた。ドーム内ではレーザー及びドームライトとピンホールを用いて、光学系の光軸合わせとカメラの焦点合わせをし、更にアルゴンランプを用いてOH夜光マスクミラー上での結像精度、波長分散度を調べた。また、望遠鏡の傾きによるOHS光学基盤の曲がりの及ぼす影響等についても調べた。観測最終日はskyのスリット測光・分光によるバックグラウンド除去効率の測定、赤外標準星の測光による光学系全体の効率の測定等、性能評価のための基本的な観測を行なった。

取得データ : 今回の観測では、性能評価のための基礎的なデータとなる様々なフレームが得られたが、その中でも特に重要な以下のフレームについて、第1回の解析を行なった。(図は1次処理後のもの) 図中、明るい四角の部分は1' x 1' の視野で、その中央にある暗い帯状の部分、バックグラウンドの減らされた部分である。分光観測等で幅の狭いスリットを用いる場合、この部分にスリットを合わせて観測を行なう。

赤外標準星	G77-31	(測光 2フレーム)	(図1)
標準星	SAO 026034	(分光 1フレーム)	(図7)
標準星	F8	(分光 1フレーム)	(図7)
Arランプ	0.3mm x 20mm slit	(分光 8フレーム)	(図9)
sky	20mm x 20mm slit	(測光 7フレーム)	(図3)
sky	0.3mm x 20mm slit	(測光 2フレーム)	(図4)
sky	0.3mm x 20mm slit	(分光 6フレーム)	(図10)

解析 : 解析は全てIRAFで行なった。以下、()内にkeyとなるIRAFのタスクを示しながら進めていく。

1次処理 : まず始めに、badpixelの登録を行なった。ダークフレームに於てある値以上のカウントをもつpixelの値を0とし、それ以外のpixelの値を1とする(imreplace)。このようなフレームを10枚程度つくり、4回以上0になった所をhotpixelであると判断し、最終的にその部分のみを0、他を1としたフレームをつくる。次に、フラットフレーム等のカウント数の高いフレームに於て、ある値以下のpixelの値を0とし上の手順と同様にしてcoldpixelのフレームをつくる。hotpixel, coldpixelを合わせたものをbadpixelであるとしbadpixelを0、その他を1としたマスクフレームをつくる(図6)。

次にこのフレームの全てのpixelの値をfileに出力し(listpixels)、値が0になっているpixelの座標を別の形式のfileに書き換える(C program:小林作)。これでbadpixelの登録は完了した。(badpixelに接しているpixelはbadpixelの影響を受けてしまうので、実際は縦方向・横方向の影響に対処するための2種類のdataを登録した。)

登録が済んだらダークを引いた後(ダークが無いものはそのまま)、badpixelの位置の値を周辺の値を用いて平均化していく(fixpix)。それでも更に残る偶発的なbadpixelは、スペクトルのdataなどに影響を及ぼすと考えられる場合、実際に1つずつ周辺の値を用いた平均化を行なう(imedit)。全て完了したらフラットで割る。

2次処理 : 標準星撮像フレームはガウス関数でfittingしてFWHM, fluxを出す(imexamine)。1次元化するフレームは1次元化する部分を切り出し(imlintran)、1次元化する(apall)。

結果

赤外標準星 G77-31 測光 (図1・図2)

: 図1は赤外標準星を500 μ m幅のスリットを用いdetector上での位置を変えて2回測光したフレームを、お互いに差し引いて処理をしたものである。図2は右側の白い点近辺でのコントアを表している。解析の結果は30secの積分で121059ADU, FWHM=2.71pixであった。1pixel=0.376arcsecとなっているので、seeingを0.7arcsecと考えても、像の広がりサイズは高々1pixel程度と結像性に関しては非常によい結果が得られた。

(設計時での目標値は、全幅で 1.5 pixel) この結果より、光学系全体の効率を計算すると

0等の flux (H)	: $F_0 = 1.26$	erg/sec/cm ² /μm
標準星の等級	: $M_s = 8.16$	mag
積分時間	: $T_i = 30$	sec
主鏡直径	: $D_t = 220$	cm
中心波長	: $\lambda_c = 1.65$	μm
波長幅	: $\lambda_w = 0.3$	μm
プランク定数	: $h = 6.626 \times 10^{-27}$	erg sec
光速	: $c = 2.998 \times 10^{10}$	cm/sec

標準星の flux	: $F_s = F_0 \times 10^{-M_s/2.5}$ = 6.861×10^{-10}	erg/sec/cm ² /μm
主鏡有効面積	: $St = \pi \times (D_t/2)^2 \times 0.8$ = 3.041×10^4	cm ²
光子のエネルギー	: $E_p = h \times c / (\lambda_c \times 10^{-4})$ = 1.204×10^{-12}	erg
総入射光子数	: $N_p = F_s \times T_i \times St \times \lambda_w / E_p$ = 1.560×10^8	photons

1 ADU = 23 photons なので、観測された光子数は
 : $N = 121059 \times 23$
 = 2.784×10^6 photons

よって光学系全体の効率は
 : $\epsilon_{tot} = N / N_p$
 = 1.79 %

この内、OHS以外の部分には、望遠鏡にアルミミラー2枚(主鏡・副鏡)、NICMOS3 camera 内にレンズ及びフィルターが5枚あるので、これらの効率は

$$\begin{aligned} &: \epsilon_{tel} = 0.90^2 = 81.0 \% \\ &: \epsilon_{cam} = 0.95^5 = 77.4 \% \end{aligned}$$

また、detector の効率はH band で

$$: \epsilon_{nic} = 0.20 = 20.0 \%$$

これよりOHSのみでの効率は

$$: \epsilon_{OHS} = \epsilon_{tot} / \epsilon_{tel} / \epsilon_{cam} / \epsilon_{nic} = 14.3 \%$$

これは、目標値(50%)に対して1/3.6の値である。(図2を見ると、星は右側が少しスリットに隠されているように見える。20%の光が隠されているとするとOHSの効率は14.3/0.8=17.9%になる。)

標準星 SAO 026034, F8 分光(図7・図8)

: 図7は、標準星SAO 026034とF8のスペクトルで引算をして1次処理したもので、H band(左), J band(右)とI bandの一部(右端)が写っている。図8はこれを1次元化したグラフである。このデータには、①OH夜光マスクのパターン(スペクトル上端部の凹凸) ②グレーティング効率の波長依存性(波長帯両端での強度低下) ③1.9μm カットオフフィルタの透過率特性(長波長側での強度低下) ④星自身のスペクトル(長波長側での強度低下) ⑤NICMOS3の波長による感度特性(短波長側での強度低下)等が混在しているが、J bandの長波長側とH bandの短波長側には②の影響しか現われないのでこのデータを見る限り、グレーティング効率の波長依存性は少ないものと考えられる。

Arランプ 分光(図9・図11)

: 図9はOHSを通してArランプを分光したもので(左側はH band, 右側はJ band)、OH夜光マスクミラー上でのスリットイメージの大きさ(結像精度)を調べるために、スリットを少しずつ(100μm)移動させながらこのようなスペクトルを8回測定した。図11はそれを1次元化したもので、左上から下に向かって順に並べてある。1回分の移動で、スリットイメージは50μm移動し、OH夜光マスクの溝近辺にあるArのラインは、この移動によりゆっくりと隠されていくことが解る。H band 及びJ band (スペク

トル左半分・右半分)に、それぞれ1本ずつその様な強いラインがあるが、H band のほぼ中央 (55 pixel 目盛り) に存在するラインは、単独で存在する強いラインで (J band のラインは殆ど複合ライン) このラインは約5回のスリットの移動により隠されている。これによりマスクミラー上でのスリットイメージの大きさは250 μ m程度であることが解り、その内150 μ mはスリットの実際の幅 (300 μ m) に相当しているのので、像の広がり大きさは、約100 μ mになっていると考えられる。理論的には像の広がり、50 μ mまでにするのが限界で、この大きさはそれほど悪くはない大きさである。(もう少し小さくする努力は必要)

sky 測光 (図3・図4・図5)

: OHSを通して1' x 1' の視野の空を見ると、図3の様に見える。中央の黒い部分が夜光の抑えられた部分で、分光観測の際にはこの部分にスリットを移動させてきて観測をする。図4はスリットを移動させてきたところで (表示のレベルは変えてある)、本来これは相当長い露出でもなかなか見えてこないはずのものであるが、まだ夜光の除去率が完全でないためにこのように見えている。この光がマスクミラーのどの部分から来ているのかを調べるためにマスクミラーを大まかに3等分し、中央・長波長側・短波長側の部分だけを用いて (他の部分は黒い紙で覆っておく) 図3の様なフレームを更に3枚撮った。それらを1次元化した結果を図5に示す。図5左上の図はマスクミラー全体を用いているもので、破線は300 μ mのスリットを用いた場合 (すなわち、図3・図4を1次元化したもの) である。中央部の強度に差があるのは、夜光が除去されていない周辺部の光が散乱されて混入しているもので、かなりの量の光が入ってきていることが解る。右上の図はマスクミラー中央部、左下は長波長側、右下は短波長側のみを用いたときのデータである。以下に各場合での夜光除去率を示す。

H band 全体	75~79%	→ 300 μ mスリットを用いた場合
H band 中央	80~83%	87~92%
H band 長波長側	72~73%	
H band 短波長側	83~85%	

OHS夜光除去率は97%以上を目指しており、現在の状況ではまだかなりの改良を必要としている。また、短波長側の方が長波長側に比べてよく除去されているという結果は、次のsky分光の結果とやや矛盾するものとなった。また、図5に於て短波長側と長波長側のフレームの夜光除去領域中心が僅かにずれていることが確認された。これはマスクミラー上での波長分散度が予定されていた値とやや異なっている時に起こるもので (即ち、マスクミラーの両端で夜光ラインの中央が溝の中央と一致しない) 両端で1/2スリット分程度ずれていると予想される。幅の狭いスリット (0.9 arcsec) を用いる場合、さほど問題にはならないが (溝幅に少し余裕があるため)、幅の広いスリット (1.5 arcsec) を用いる場合、深刻な影響を及ぼすものと考えられる。

sky 分光 (図10・図12)

: OHS夜光ラインが、実際にどの程度除去されているかを測定するために、スリットを幅の半分 (150 μ m) ずつ移動させてskyの分光観測をした。図12は最も夜光ラインが除去されたときのスペクトルとその前後のスペクトルを、左上より順に下方向に並べたものである。(図10は図12右中のグラフに対する元のイメージで、この一群のデータはダークフレームが無かったため、このようになかなか凹凸のあるものとなってしまった。) 図12を見ると、H band 長波長側 (10-60 pixel) ではかなりの夜光ラインがよく取り除かれているのに対し、H band 短波長側 (60-110 pixel) では強いラインがかなり残ってしまっている (sky測光の結果の逆)。J band のラインに関しては有為な情報は得られなかった。また、この観測ではsky測光で予想されたライン中心と溝中心のずれは、完全には確認できなかった。(短波長側で強度最小となる場所は確認したが、長波長側で強度最小となる場所は確認できなかった。)

考察 : 今回の観測で、現在のOHSには解決すべき重要な課題が2つ存在することが確認された。一つはOHS内部での光の損失が大きすぎる (効率が悪い)、もう一つはOHS夜光の除去率が良くないことである。以下、この2点に関しての考察を行なう。

効率: OHSは2個のグレーティングを含む11個の金蒸着の反射面で構成されており、反射面1個あたりの反射率は96%以上と測定されている。また、グレーティングの効率は測定されていないが中心波長で80%程度と考えられ、理論的には同じグレーティングを用いて分散のかかった光を再合成する場合、グレーティングとしての光の損失は無いとされている。その他、マスクミラーの有効面積 (溝以外の部分の比率) は80%である。これらの事からOHSの効率を計算すると、

金蒸着面の反射率 : $R_g = 0.97$
グレーティング効率 : $\epsilon_g = 0.80$
マスクミラーの有効面積 : $S_m = 0.80$
OHSの効率 : $\epsilon_{OHS} = R_g^2 \times \epsilon_g \times R_g \times S_m$
= 47%

これは、2個目のグレーティングを単に金の反射面として扱ったものであるが、2個目のグレーティングの効率も80%、更に金の反射率を96%としてOHSの効率を計算すると、

$R_g = 0.96$
 $\epsilon_g = 0.80$
 $S_m = 0.80$
 $\epsilon_{OHS} = R_g^2 \times \epsilon_g \times \epsilon_g \times S_m$
= 35%

今回の観測でOHSの効率(14%)がこの値に達しなかった原因として考えられることは、①望遠鏡とOHSの光軸の角度のずれ ②OHSとNICMOS cameraの光軸の角度のずれ 等である。②に関してはNICMOS cameraの取り付け精度が光軸のずれの許容範囲以下であるため、それほど問題にはなっていないものと思われるが、①に関してはコリメーターミラー直前でピックアップミラーを用いて、望遠鏡の軸がOHSの軸と一致していることを目で確認したのみであるから、その後の光学系で入射光がミラーの中心に当たっていない可能性はある。この事を確認するために、次の観測では各ミラーを半分だけ覆い隠し、1つのミラーに付き上下左右計4回の積分をして、入射光が各ミラーのどの部分に当たっているかを調べる予定である。

夜光除去率: 夜光の除去率はskyの測光・分光により90%程度であることが解ったが、目標の値に達しなかった原因として、①マスクミラー位置が焦点面から少しずれている可能性がある ②マスクミラー位置での波長分散度が予定の値になっていない ③マスクミラーの溝上にある夜光ラインが十分に除去されていない ④マスクミラー設計に用いたOH夜光ラインのデータが正しくない 等が考えられる。①に関しては、Arランプの分光データからそれほど焦点面から外れてはいないと考えられることと、この影響は各夜光ラインに付いて均等に現われるはずであるのに、skyの分光データには明らかに短波長側に完全除去されないラインが多く存在することから、この影響は少ないものと考えられる。次に②であるが、sky測光のデータよりこの問題は確かに存在すると考えられ、解決せねばならない事ではある。しかし、sky分光で、スリットをどこに移動させても完全に除去されないラインが存在するのは、この事が原因ではない。③に付いては、強いArのラインがマスクミラーの溝部分に当たると完全に見えなくなってしまう事から、可能性は低いものと思われる。とすると残りは④であるが、実際に実験室でO₃とH₂より作られたOHラインのデータ(R. Hubbard and J. Brault)を用いシミュレーション(図13)したところ、かなり近い状況が再現されることが解った。夜光除去の為のマスクミラーは、波長分解能約3000で観測した我々独自のデータを元にして設計してあり(マスクミラー上での波長分解能は約5000)、その時の測定誤差が完全に除去されないライン群を作り出しているようである。また、その時の観測では、H band 短波長側で強度の強いラインがH band フィルターの特性により、殆ど観測されなかったことがこの部分での除去率の悪さを一層大きくしていると言える。これを改善するにはかなり多くの部分の修正が必要であるが、是非とも完全に修正をして次の観測に望むつもりである。

まとめ: 今回の試験観測によって、OHSには効率と除去率の点に問題があることが確認された。(効率: 約14%、除去率: 約90%) その為にならなければならない事は以下のとおりである。

- ・望遠鏡の光軸とOHSの光軸を完全に合わせる。
- ・マスクミラーを実験室でのOHラインのデータに合わせて修正する。
- ・マスクミラーを微小に前後させるような機構を考え、完全に焦点面に合わせる。
- ・コリメータとマスクミラーを動かすことにより、波長分散度を調節しマスクの溝中心とラインの中心を一致させる。

図1. 赤外標準星G77-31 測光

スリット $1''.5 \times 60''$
積分時間 30 sec
フィルター H band

ディテクター上での位置の違う
2つのフレームの差を表示した
もの。

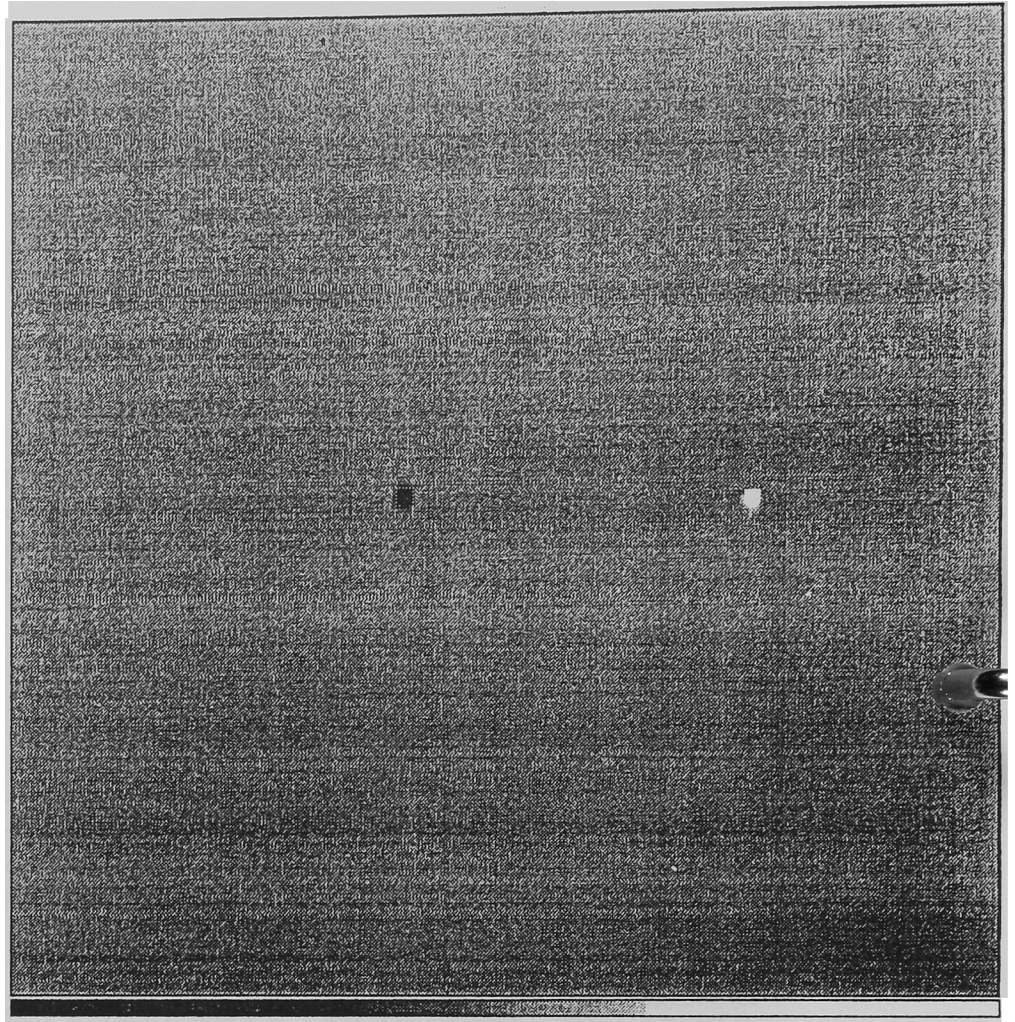


図2. 星周辺のコントア

FWHM 2.7 pix
($1''.0$)

星の右側が少しスリットにか
かっているらしく、星の中心
が右側にずれている。

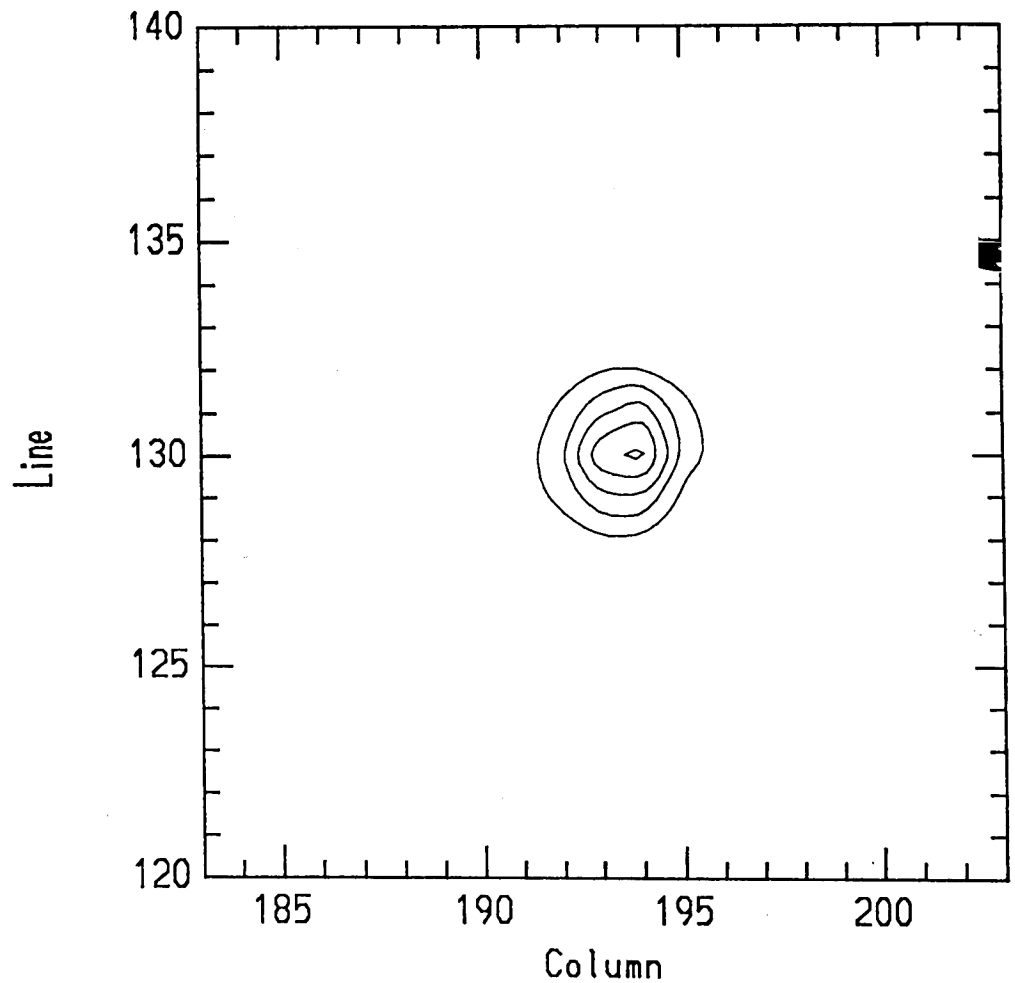


図3. sky測光

視野 60" x 60"
積分時間 60 sec
フィルター H band

中央の黒い部分が夜光の抑えられている部分。中央部以外は使用しないので、左端・右端は効率が低下しているが問題ない。

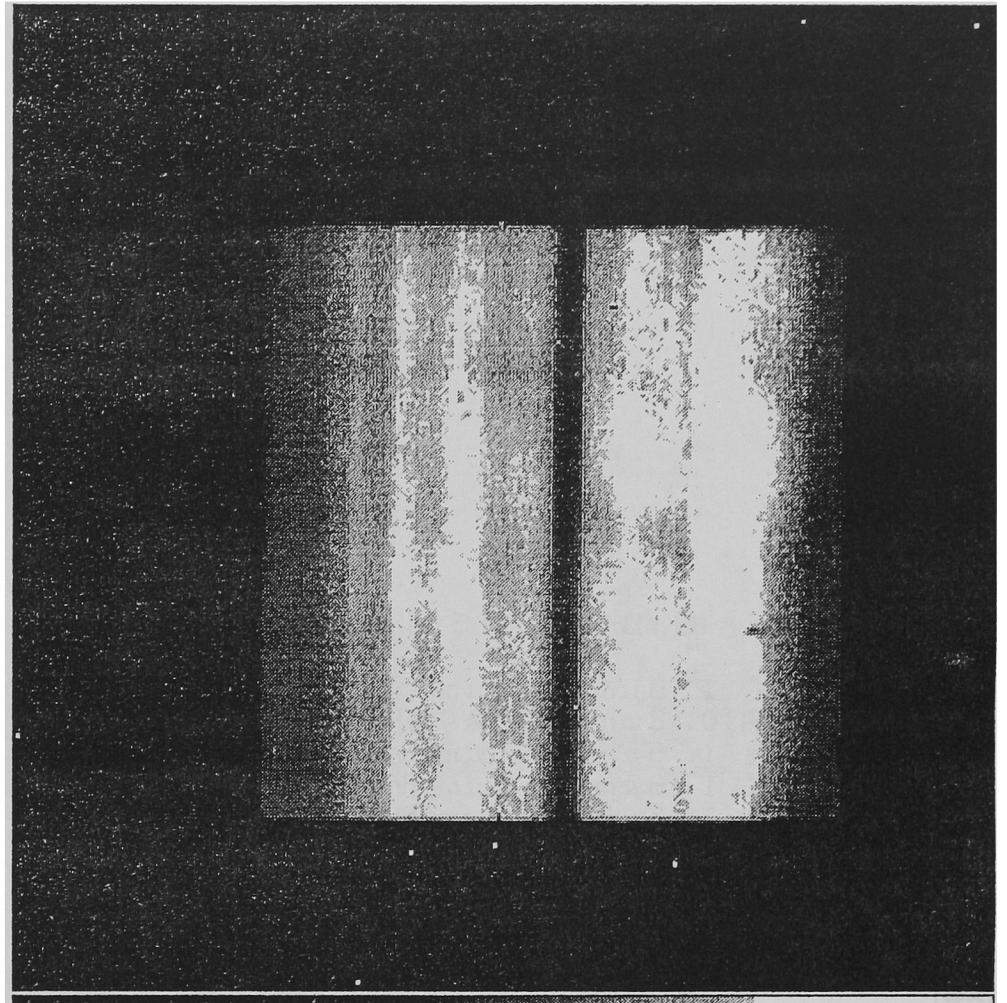


図4. sky測光

スリット 0".9 x 60"
積分時間 60 sec
フィルター H band

図3中央の黒い部分にスリットを移動させて積分したもの。

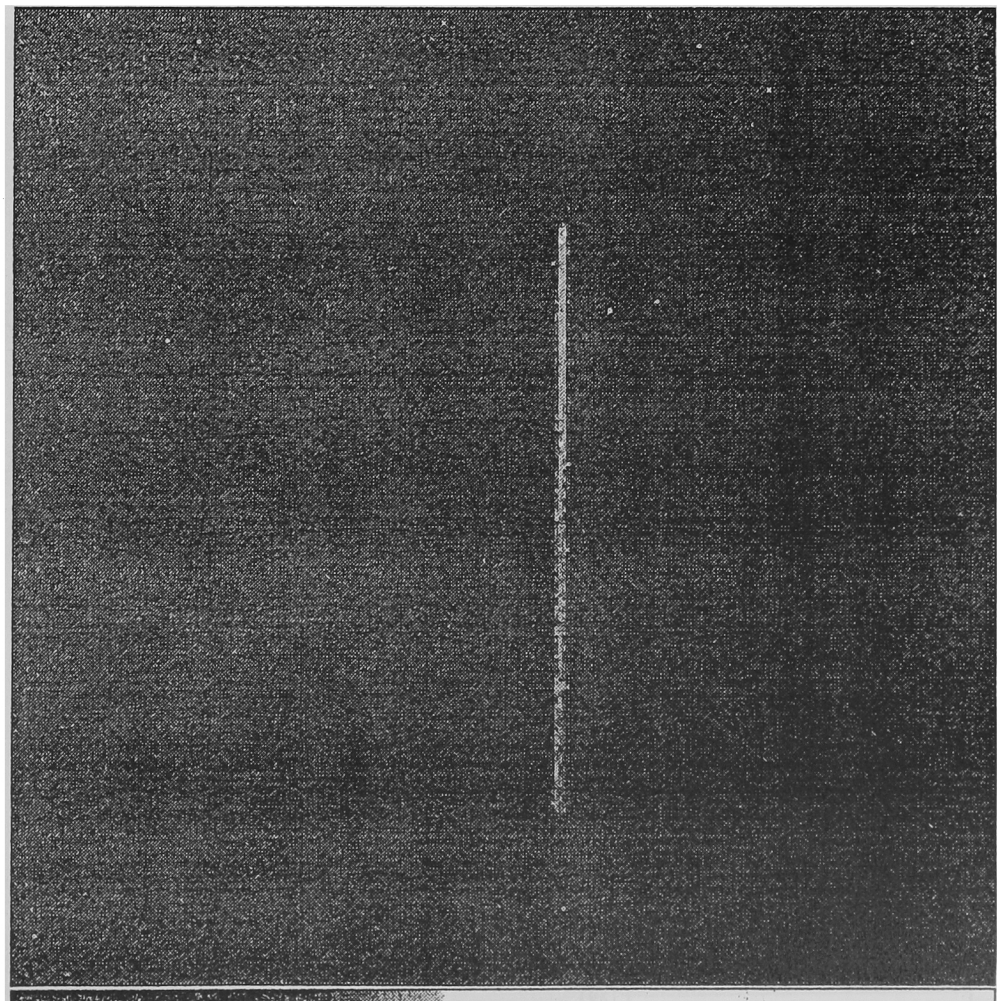


図5. sky測光 (縦軸は ADU/75pix/60sec)

左上: 波長 1.5 μm ~1.8 μm 、図3を1次元化したもので中央部が夜光が除去されている領域である。
破線は0.3mm (0".9) スリットを用いた場合で、これにより周辺部からの散乱光が取り除かれる。
右上: 波長 1.5 μm ~1.6 μm 付近での測光データ
左下: 波長 1.6 μm ~1.7 μm 付近での測光データ
右下: 波長 1.7 μm ~1.8 μm 付近での測光データ

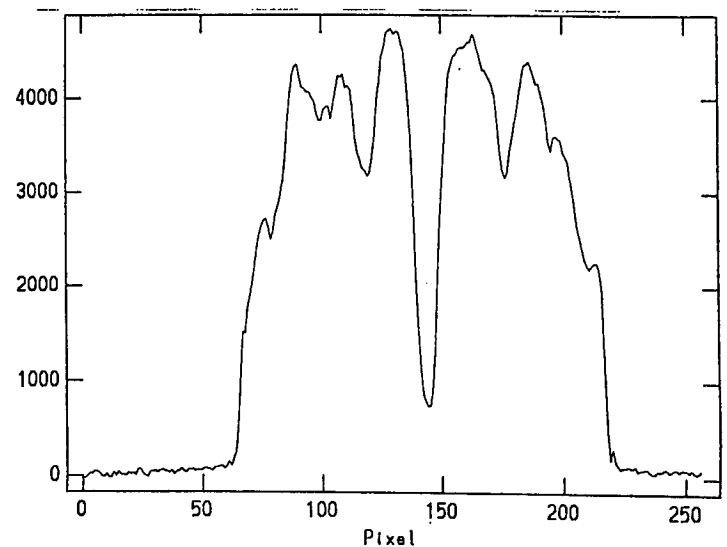
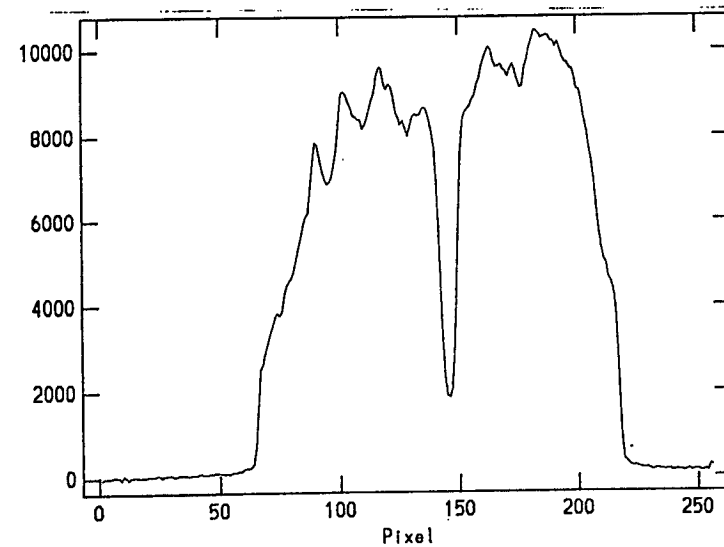
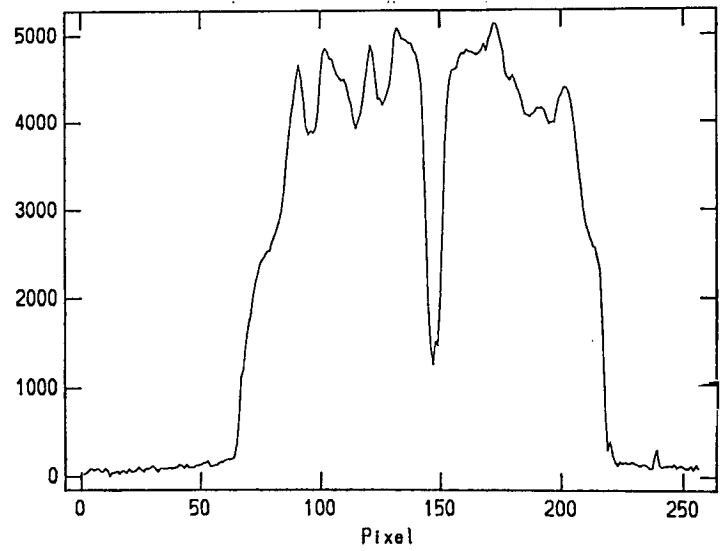
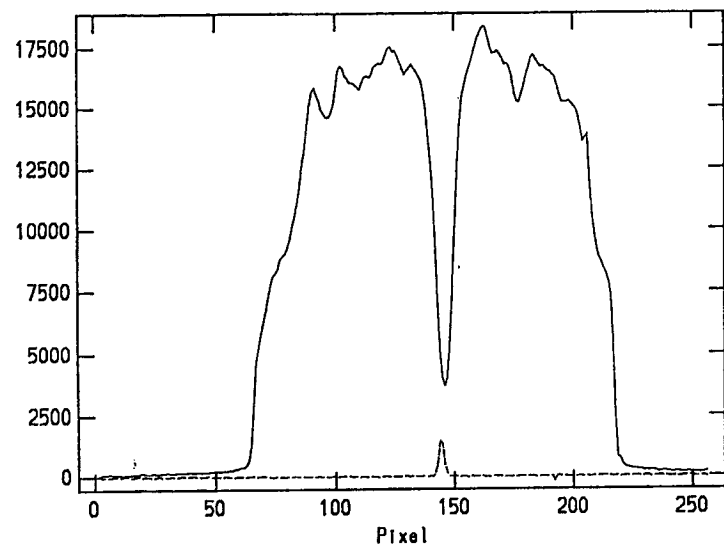


図6. Bad pixel

感度の無い不良ピクセルは全体の約2% (1300 pixel) 存在する。これらの不良ピクセルとその周辺の部分は、そのピクセル自身の値は無視され、周辺の平均値で置き換えられる。

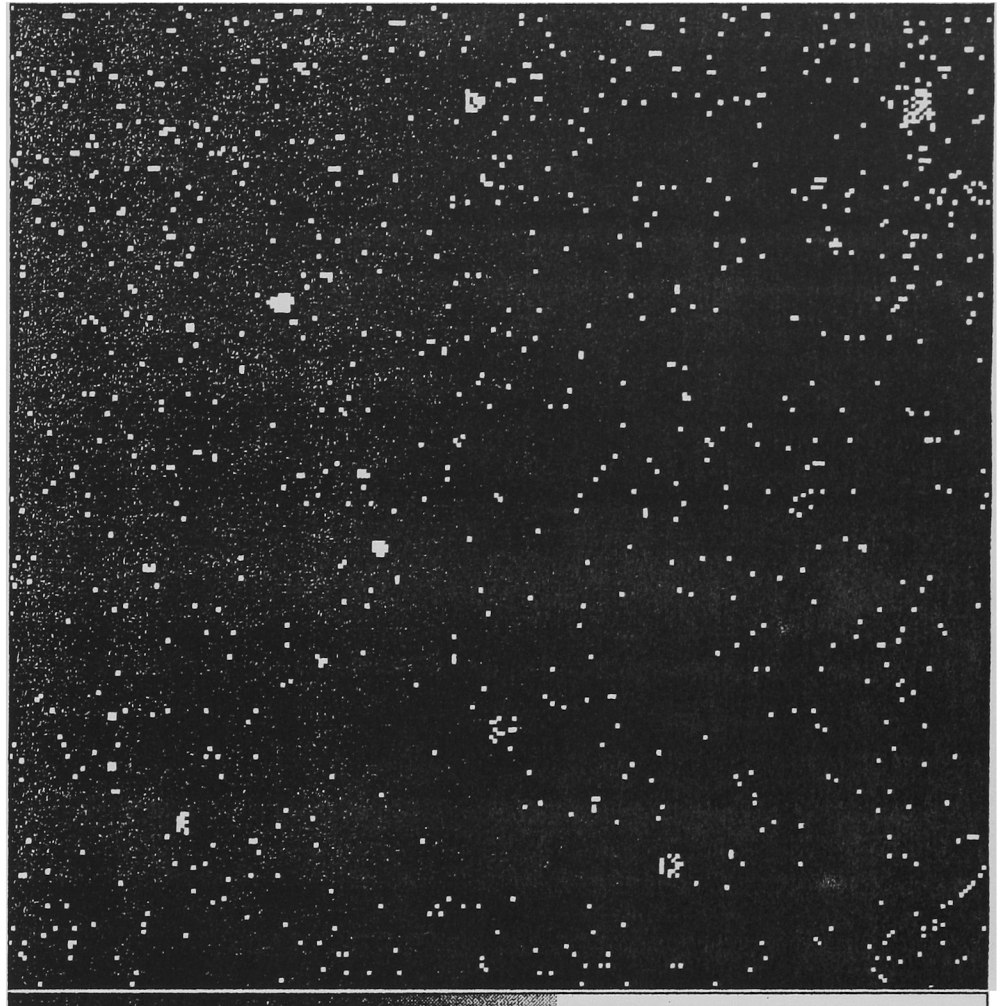


図7 標準星SAO 026034
・F8 分光

スリット 1".5 x 60" (SAO)

0".9 x 60" (F8)

積分時間 30 sec

フィルター 1.9 μ m cut off

スリット上で位置の違う2つの星のフレームの差をとったもの。上がSAO 026034、下がF8で左がH band 右がJ bandとなっている。

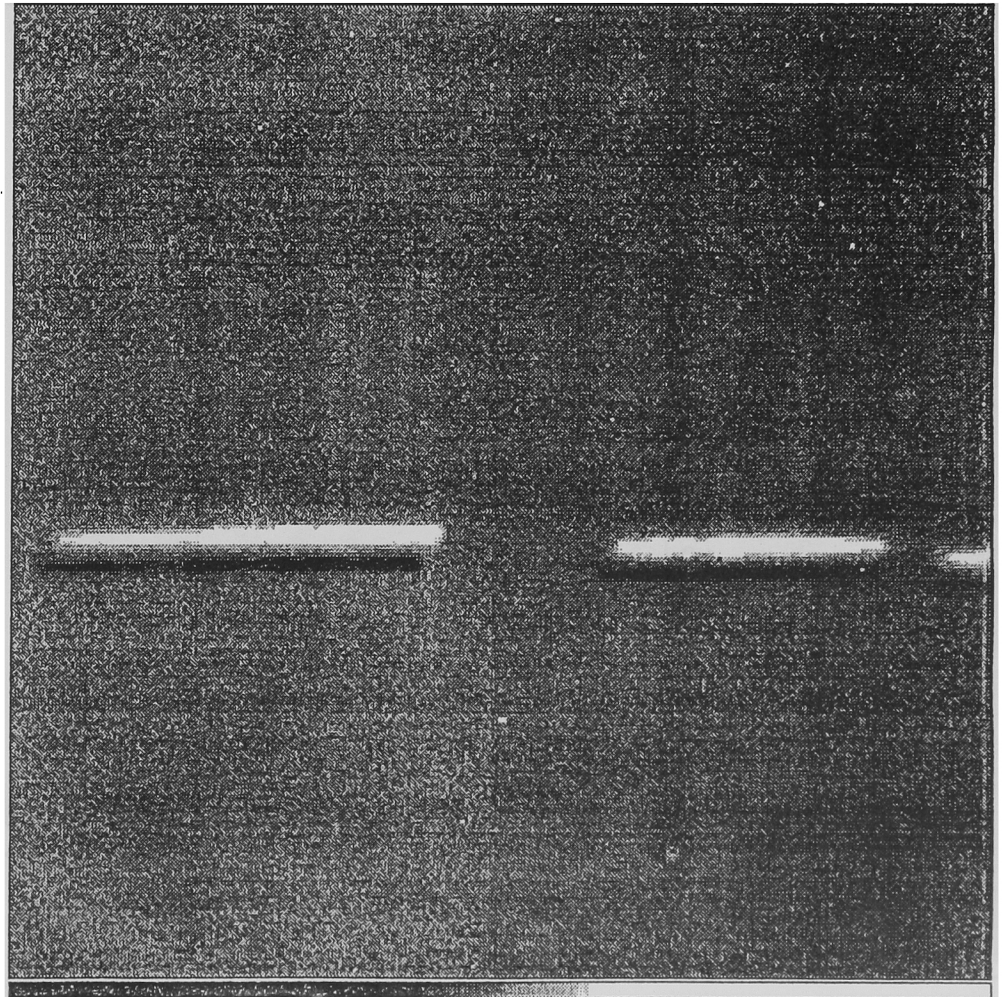


図8. 標準星のスペクトル

図7の2つの星のスペクトルを1次元化したもの。上が SAO 026034、下が F8 で右がH band 左がJ band となっている。
(図7と左右逆)
観測対象天体は、これらのスペクトルで割り算をすることによって規格化される。

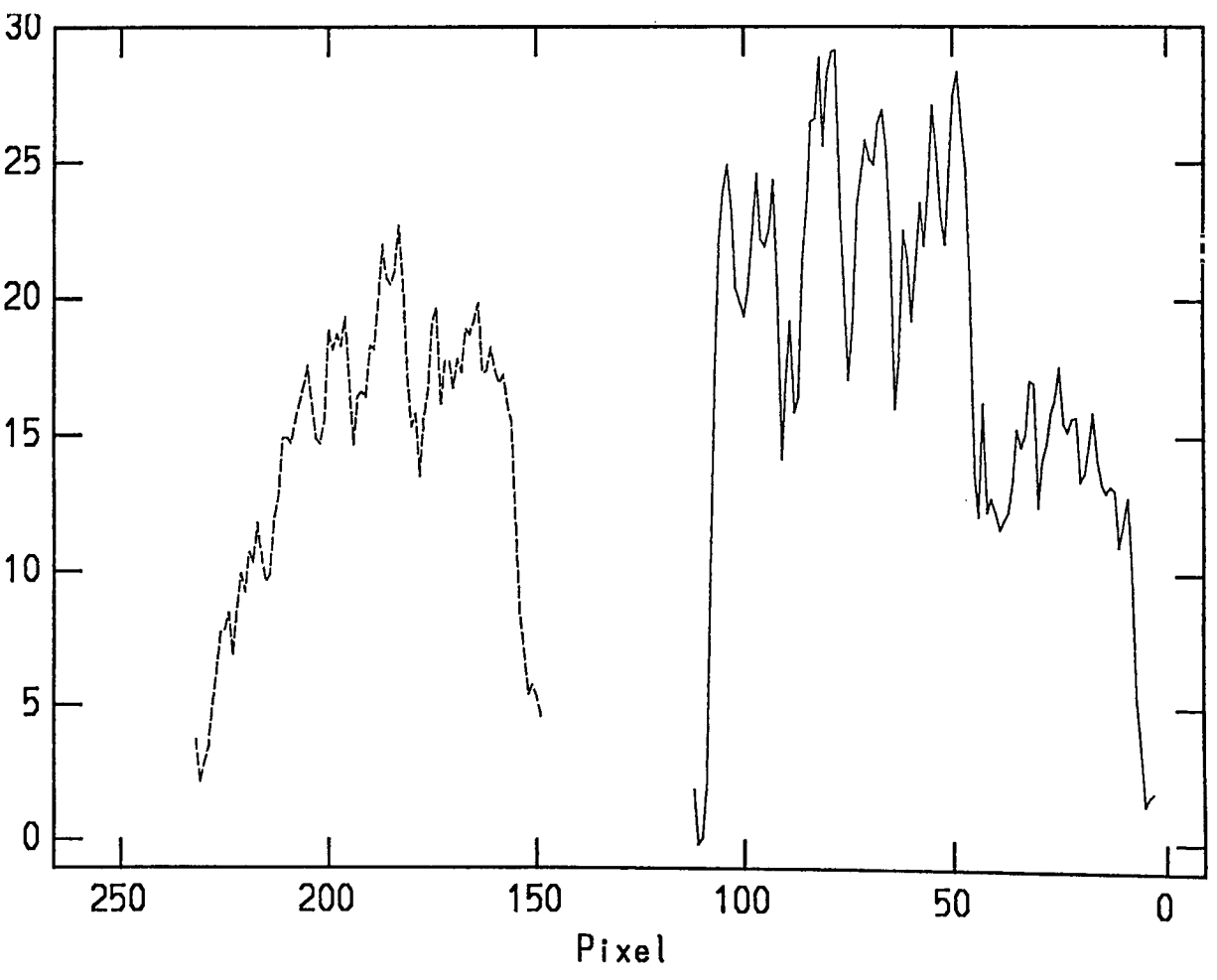
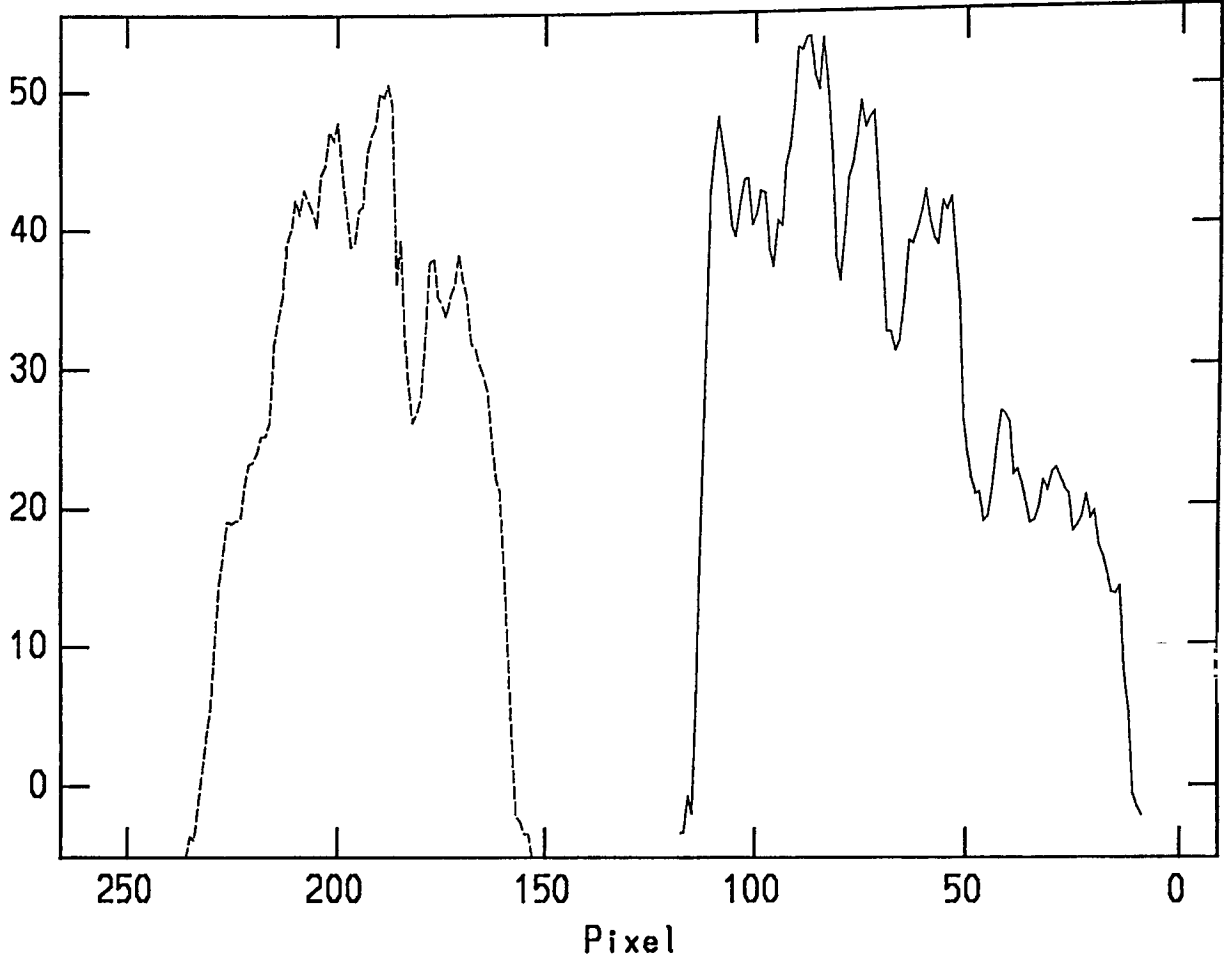


図9. Arランプ 分光

OHSのスリット直前にArランプを置き、分解能約200で分光した。左がH band 右がJ band である。光源が均一になっていないため、強度の強い所と弱いところがある。

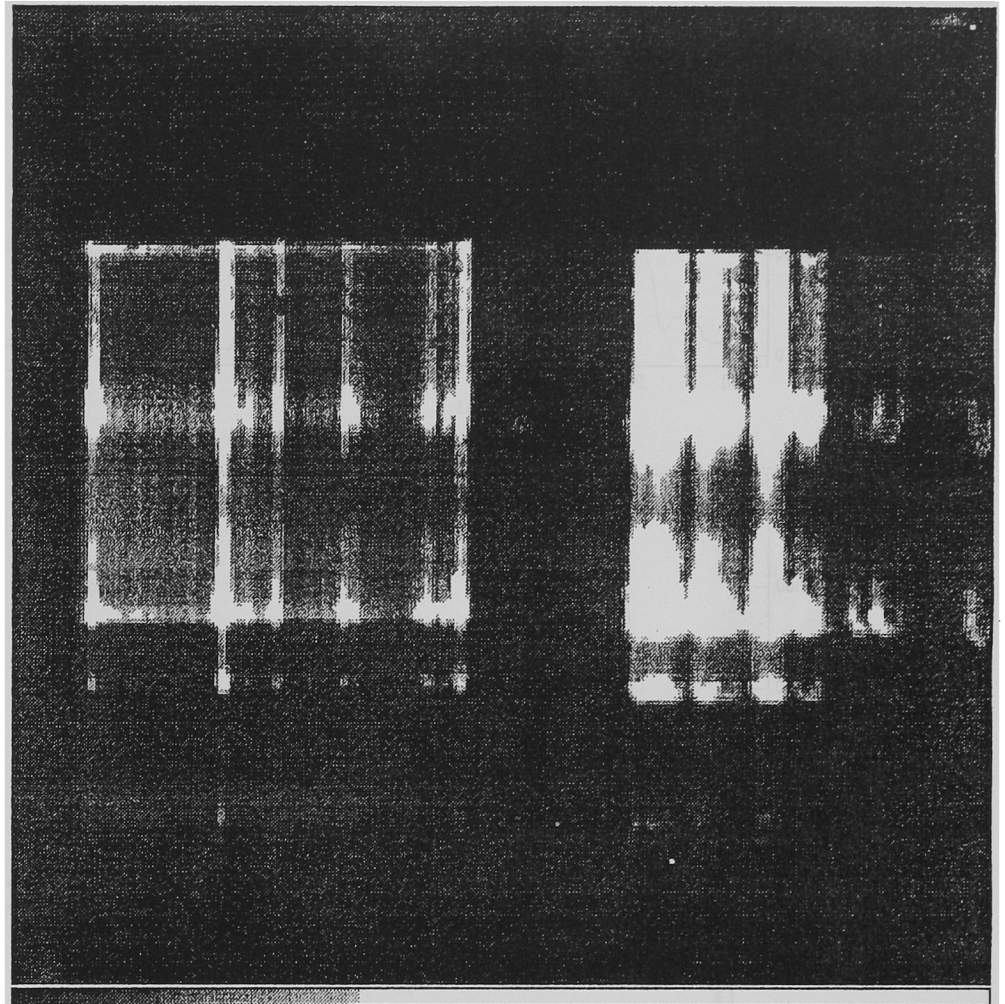


図10. sky分光

スリット 0".9 x 60"
積分時間 480 sec
フィルター 1.9 μ m cut off

このフレームに対応するダークフレームが無いので、特別なマスクをつくり処理をした。1次元化の際に切り出す部分は、巨大な bad pixel を避けて選び、スペクトル周辺部は手作業で処理をした。

図11. Arのスペクトル (次項)

スリットを100 μ mずつ移動させて、ArのラインがOH夜光マスクに隠されていく様子を調べたもの。(図9と左右逆になっている) J band のラインは数が多いので、ほとんどが分解されていないものである。H band のラインは単独で存在し、マスクミラー上での結像精度を知ることができる。また、ランプは高温になるので、熱輻射も見られる。

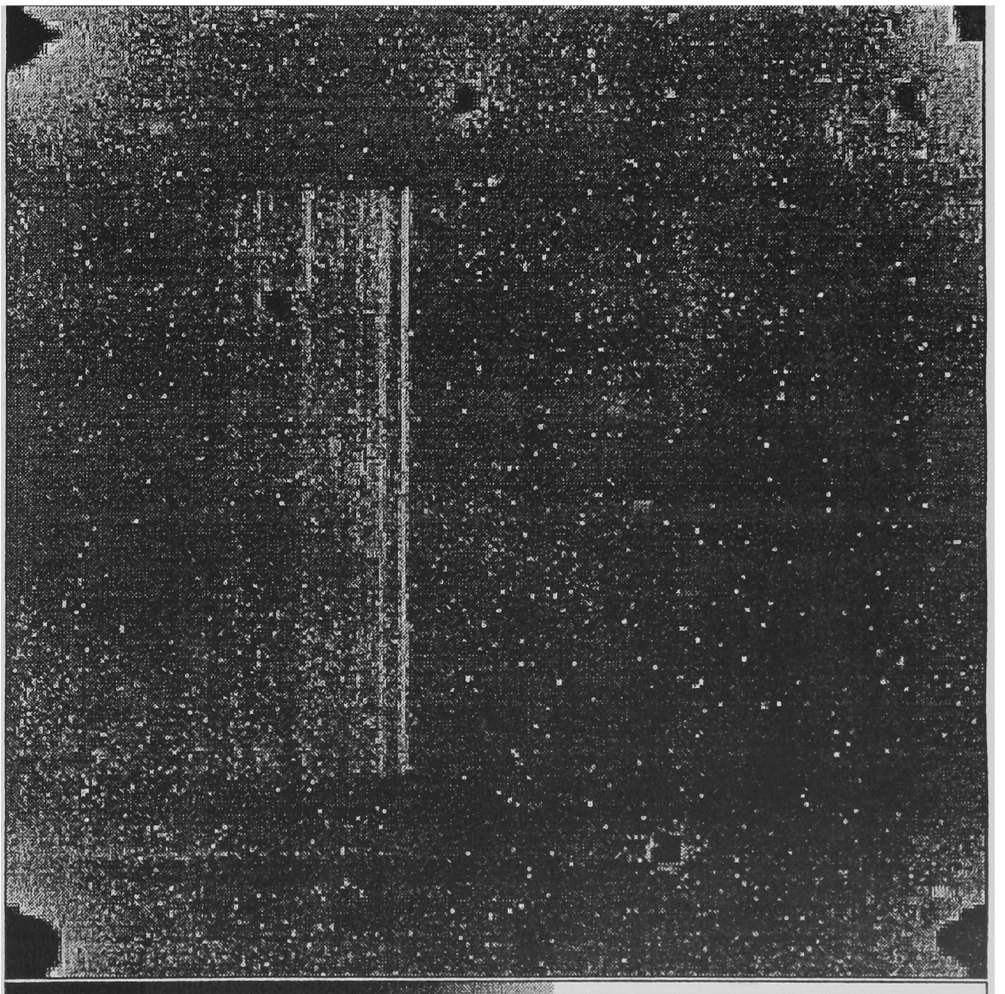
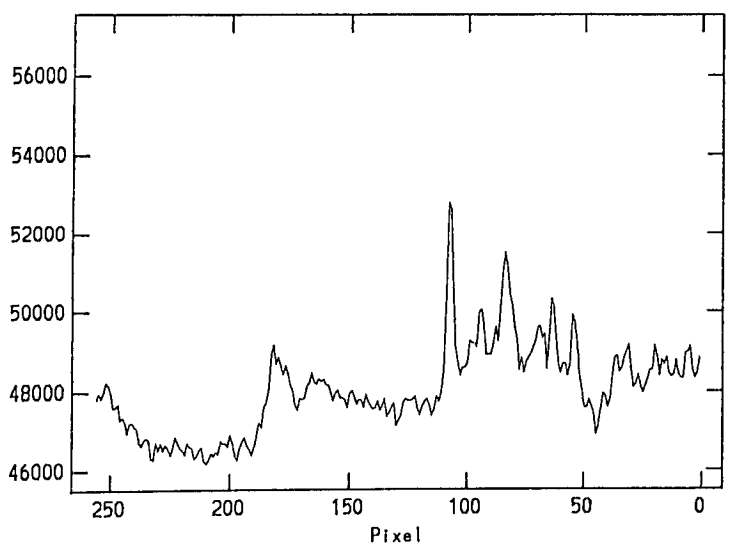
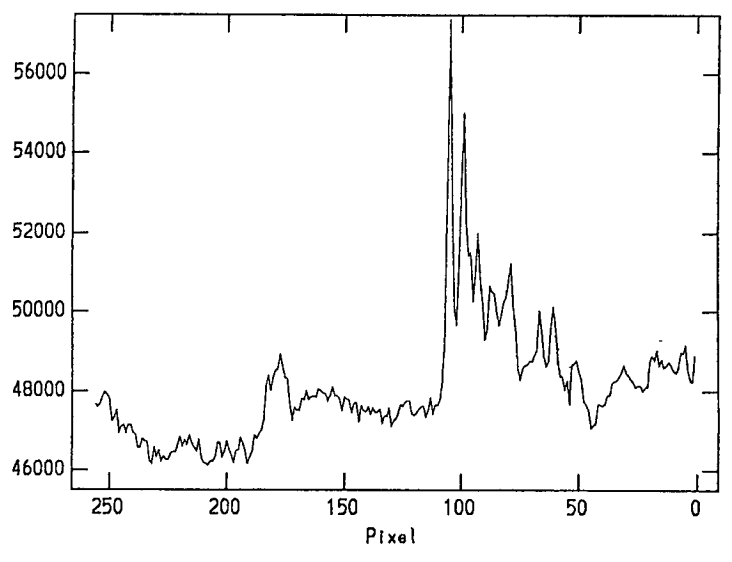
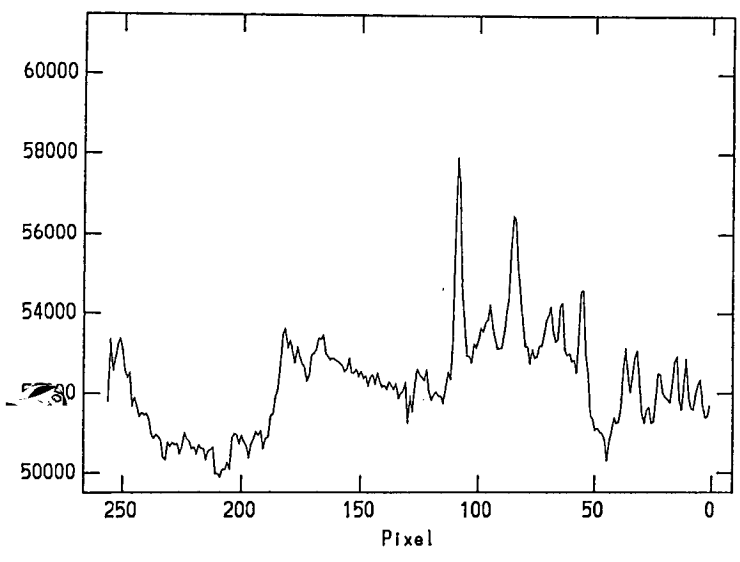
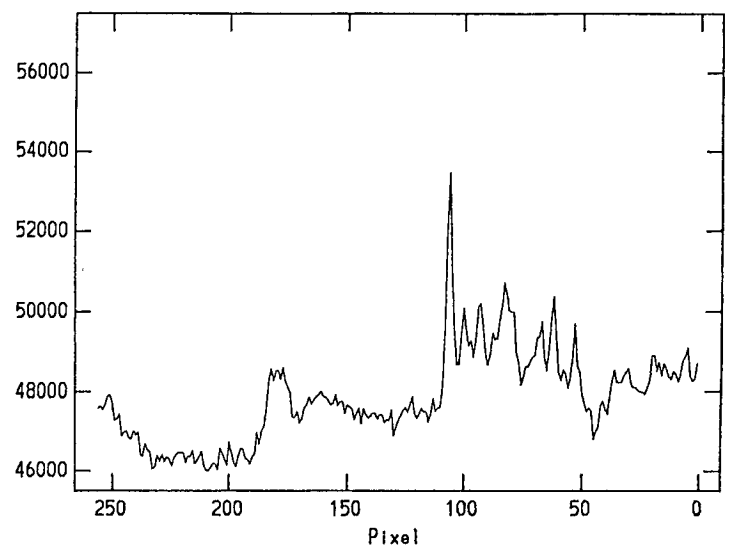
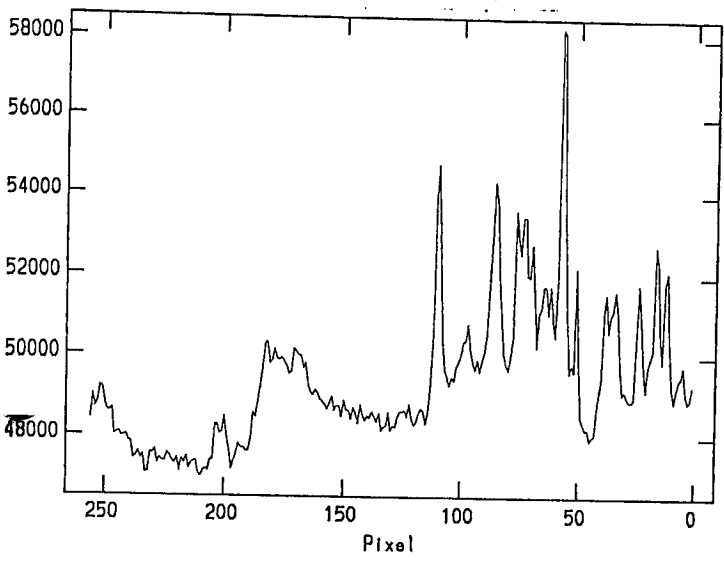


図12. OH夜光のスペクトル (縦軸は ADU/75 pix/75Å/480sec)

スリットを150μmずつ移動させて、OH夜光ラインがマスクミラーによって隠されていく様子を調べたもの。ダークを引いてないので、0レベルが平になっていない。本来完全になくなるはずの夜光ラインが、かなり残ってしまうのが解る。



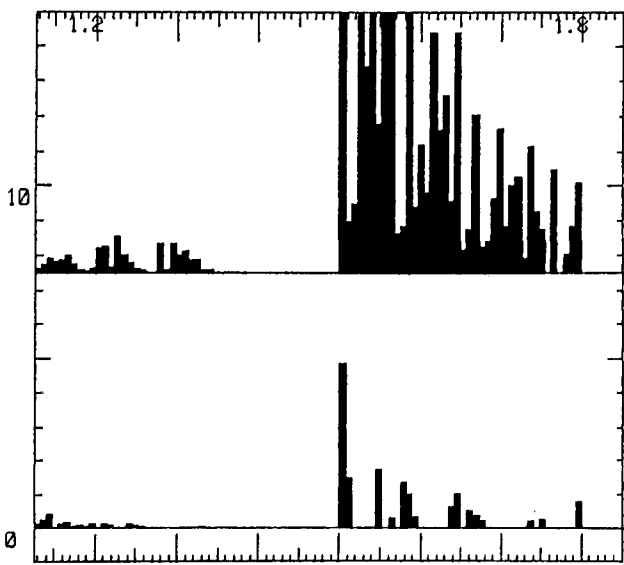
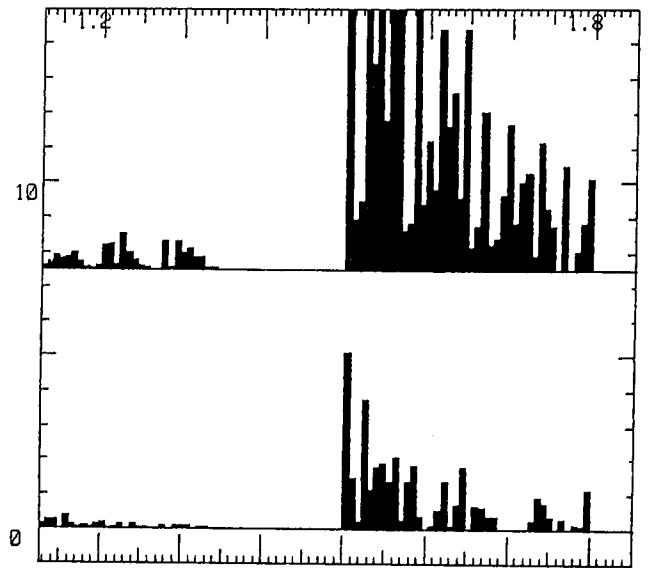
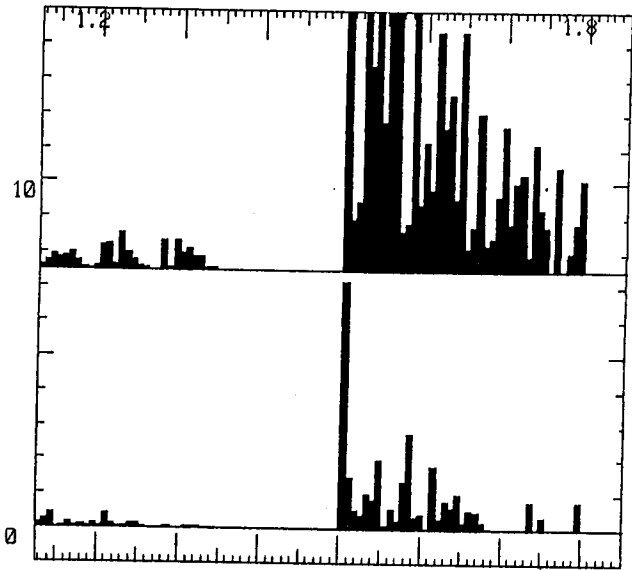
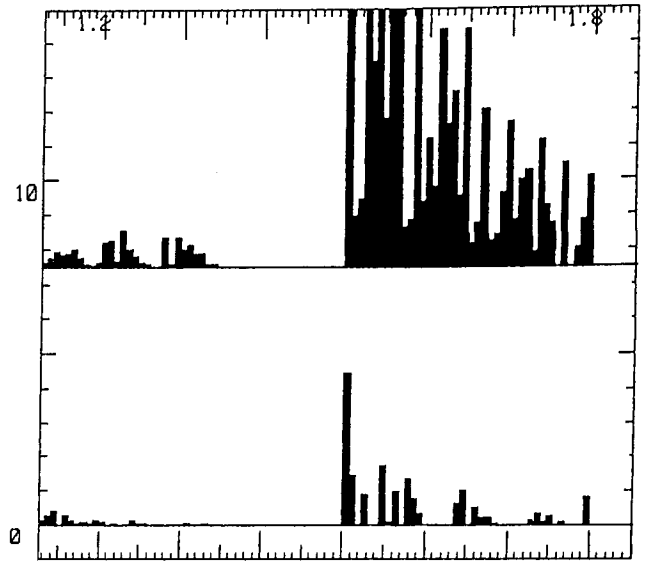
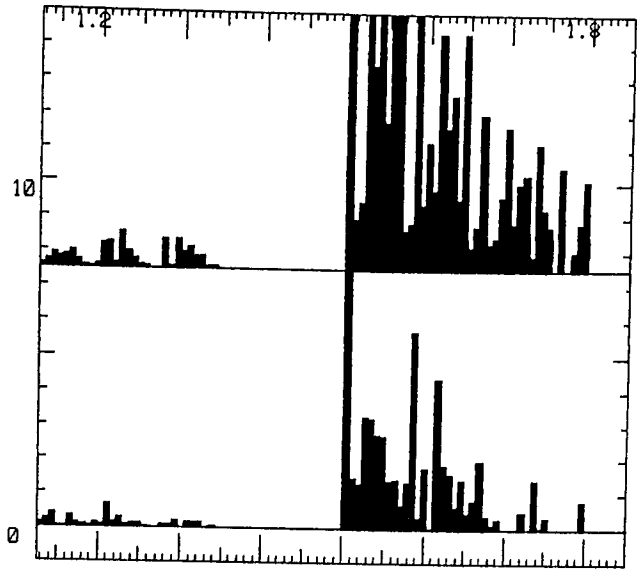


図13. 実験室でのOHライン測定データを用いた
夜光ライン除去のシミュレーション

実験室で測られたOHラインのデータを用いて
図12の状態を、シミュレーションにより再現
したもの。各グラフ上段は、除去されてい
ない場合のOHラインのスペクトルを表し、
下段はOHsを用いたときのスペクトル
の様子を表している。波長分解能は200
としてある。実験室と上空では状態が
違うので、ラインの強度比は実際の夜
光ラインのものとはやや異なる。

A p p e n d i x D
第二回観測結果

- 観測日時 : 1993年3月11日~17日
 観測場所 : ハワイ・マウナケア山
 観測装置 : UH88 (カセグレン焦点) + OHS + NICMOS3 camera
- 観測概要 : 今回は観測4日前から準備を始め、2日前に NICMOS3 camera を取り付けて、実験室で OHS の効率と Mask mirror 上での結像精度を調べる事ができた。観測1日目は seeing は悪かったが晴れで、標準星を用いての光軸合わせ、実際の sky による Mask mirror 位置の調整、夜光除去率の測定、望遠鏡を含めた観測システム全体の効率の測定、月の影響等に付いて等、基礎的な観測を行なった。2~4日目は、雪と強風のため観測はできなかった。5日目は風がまだ強く、観測方向は制限されていたが、NGC4151 (Sy1), 1225+317 (QSO), 1358+115 (QSO), ARP220 (Starburst galaxy) の観測を行なった。6日目は high cloud のため、明け方近くまで観測できず、ARP220 のみを観測した。7日目は晴れの良い天気で、NGC3690 に現われた超新星、M3 (globular cluster), ARP220 の観測を行なった。夜光除去率・効率ともに悪くはなかったが、どちらもまだ満足な性能とは言えない。現在、最も問題となっているのは、H band 長波長側からの熱輻射成分で、測光時には sky バックグラウンドの方が大きい、分光時にはノイズ源の7割以上を占めている様である。
- 解析手順 : 解析は以下の手順で進めた。ARP220, M3 に関しては別に報告を行なう。
 1) bad pixel mask の登録と dark current の検査。
 2) standard flat image の作成。
 3) OHS の光透過効率の検査。(実験室の光源を用いての data)
 4) Mask mirror 上での結像精度の検査。(Ar lamp の data)
 5) system 全体の効率検査と光軸の調整。(standard star)
 6) 夜光除去率の検査。(sky)
 7) 月の影響の検査。(sky)
 8) Seyfert1 NGC4151
 9) Quasar 1225+317, 1358+115
 10) Supernova in NGC3690
 11) dark level の変化と各 pixel の性質
 以下、順を追って解説する。

1) bad pixel mask の登録と dark current の検査。

bad pixel の定義には次の3つが考えられる。

- ①: 真っ暗な状態でも大きい値を出力するもの。(hot pixel)
- ②: 明るい状態でも0に近い値、もしくは負の値を出力するもの。(cold pixel)
- ③: 出力値が入射光子数に比例しないもの。

まず、hot pixel を調べるために7日間の観測で得られた28枚の dark frame 全てに付いてヒストグラムを求め、 2σ 程度以上離れている(目で判断して) pixel の値を0とし、正常な値を出力している pixel の値を1とした frame をつくる。次にこの28枚の frame の和を取り、2.5以下の pixel は hot pixel とみなし(即ち、28回中3回以上悪い値を出力したものは、hot pixel であると定義した) それらの値を0と置き直し、その他の pixel の値を1とした hot pixel frame をつくる。間接照明により得られた26枚の flat frame に付いても同様な処理をし、cold pixel frame をつくる。この2つの frame の積を bad pixel frame とし、この frame を用いて bad pixel の座標の table をつくる。③の線形性の無い pixel は顧慮されていないが、かなり厳しい条件で bad pixel を決定したので、これで十分であると判断した。bad pixel の割合は、全面積の 2.62%にも達し(図1)、前回の試験観測での bad pixel が1.62%であった事を考えると、今回はかなり厳しい条件で判断したといえる。

熱輻射成分を含めた dark current は、このとき大まかな値を調べたところ、H filter を用いたときには約0.7~1 ADU/sec、J filter では約0.05~0.1 ADU/sec、 $1.9\mu\text{m}$ cut off filter では約2 ADU/secであった。これらの値に

付いては後で詳しく考察する。

2) standard flat image の作成。

OHSは NICMOS の一部しか使用しないので、検出素子全面にわたる flat image を撮るために、Refocus mirror の全面に白い紙を張り、非常に暗い豆電球で間接照明をして、露出時間・filter 等を変えて合計 26 枚の frame を得た。ほとんど同様な条件で露出したにもかかわらず、あまり一定した flat pattern は得られなかったが、その中でも最も標準的だと思われる 6 枚の image に付いて平均を取り、それを standard flat とした。やや量子効率の良いところで normalize したので、0.6~1.2 程度の値となっている。bad pixel は周囲の値で平均化してあるが、smoothing はしていない。(図2)

3) OHSの光透過効率の検査。(実験室の光源を用いての data)

望遠鏡ドーム1階での準備期間中、OHSに NICMOS camera を取り付けて光軸合わせ、透過効率の検査、Mask mirror 上での image size の測定等を行なった。皆、望遠鏡に取り付けてから再度行なったことであるが、ここでは f/31 光源を用いた OHS の効率検査に付いて簡単に報告する。まず、OHS の slit から f/31 の人工光を入射させ 0.2 sec 積分をして(図3、flux が大きいので焦点からずらして露出) count を調べる。このとき中心の黒い部分(NICMOS camera 中の cold stop)と、左下の削れている部分(レーザーホルダーの影、実際の観測の際にはもちろん外すもの)の面積は補正し、光がケラれていない状態での count を計算する。次に、f/31 の人工光を直接 NICMOS camera に入射させ(図4)、同様に面積補正をして count を調べる。この様の測定を2回行い、OHS の効率を計算したところ、20%であった。bad pixel や面積の補正など不確定な要素が多いが、OHS が透過させる H band 幅が H filter よりもやや狭いことを考えると、この値は妥当なものであるといえる。(5) 参照)

4) Mask mirror 上での結像精度の検査。(Ar lamp の data)

Ar lamp を OHS の slit 直前に置き slit をある程度移動させると、Mask mirror 上で Ar line の位置が移動し、夜光除去マスクの中に入れてしまうことが可能である。周囲に line が無い単独の強い line で近くに夜光マスクのあるものは H band に 2 本存在し、それらの line を slit を移動させることにより、徐々に夜光マスクの中に移動させながら、強度の変化を調べた(図5)。強度の変化率が image の強度分布であると考えられるので(図6)、それにより Mask mirror 上での image の全幅を推定すると、slit 移動量にして 500 μm 、Mask mirror 上ではその半分になるので 250 μm の幅の image ができていたことになる。この内、実際の slit 像が 150 μm に相当するので結像精度は全幅で 100 μm であったと推定される。slit と夜光マスクは完全に平行とはなっておらず、この 100 μm の内のかなりの割合がその様な原因によるものであると考えられる。今後、slit と夜光マスクを平行に近づける努力が必要である。

5) system 全体の効率検査と光軸の調整。(standard star)

観測期間中、何度か standard star を撮ったが、その内の 3 つに付いて system 全体の効率を計算した結果を示す。(それぞれの結果は 2 回の露出の平均値で計算した)

観測日	天体名	等級 (H)	count (ADU/30sec)	効率
3. 11	FS24	10. 772	31306	4. 1%
3. 15	FS28	10. 644	39859	4. 6%
3. 17	FS18	10. 550	40768	4. 4%

この結果より、system 全体での効率は約 4.4% であり、望遠鏡の効率を(主鏡の central hole も含めて) 70%、NICMOS camera の効率を H band で 20% とすると、OHS の効率は 31% となる。実験室での結果を考えるとやや大きい値であるが、25% 以上の効率は有るものと予想される。

また、非常に明るい星(0~1等星)を用いて焦点面からずらした像を撮り(図7)、

光学系の光軸がずれていないかを調べた。結果は良好であった。

6) 夜光除去率の検査。(sky)

夜光除去率は以下の3つの要因によって決定されている。

- ①: 夜光除去マスクに対し、正しい倍率で分散がかかっていること。
- ②: Mask mirror 上で slit の像が十分に sharp になっていること。
- ③: 夜光除去マスクが正しくつくられていること。

Mask mirror 上では各波長の光軸は平行になっていないので、①の条件は Mask mirror を前後に移動させることにより満たすことができる。但しこの場合、②の条件が破られてしまうので、Collimator mirror を前後させて補正することが必要である。これらの作業を行なう前と行なった後の結果を図8に示す。夜光が除去されている部分は、図8中央部の暗い部分であるが、この部分に平行に slit を移動させると、周辺部の明るい部分からの散乱光の混入がなくなり、非常に暗い状態となる。夜光 line の波長測定精度、夜光マスクの製作精度等の影響により、slit 幅は狭いほど夜光除去率は高くなる。(図9) 今回の観測では、1".5(500 μ m) slit に対し factor 17、0".9(300 μ m) slit に対し factor 22であった。分光観測の結果、数本の夜光 line が完全に除去されていない状態で残っていることが分かった。

7) 月の影響の検査。(sky)

月の散乱光の影響を調べるために、月からの角度と空の明るさの関係を調べた。(図10) 観測時はほぼ半月でよく晴れていたが、夜光強度はかなり小さく 14000 photons/s/m²/ μ m/arcsec² (平常時の値の約5割)であった。観測の結果はほぼ次式で表される。

$$F_{\text{half}}(\theta) = F_{\text{new}} \cdot (1 + (\theta_d / \theta)^2)$$

$$F_{\text{new}} = 1070 \text{ photons/s/m}^2/\mu\text{m/arcsec}^2$$

: 今回の観測での、夜光除去された dark night の空の明るさ。(この日はまだ調整が完全ではなかったため、rejection factor 13であった)

$\theta_d = 14^\circ$: 月からの散乱光の寄与が、 F_{new} と同程度になる角度。

この結果、半月の夜の観測は月から 40° 程度 離れる必要があることが分かった。

8) Seyfert1 NGC4151 (z=0.00324)

H band 撮像	10 sec x 3	: H = 10.14 (4" ϕ)
J band 撮像	30 sec x 1	: J = 9.27 (4" ϕ)
分光	240 sec x 2	: (図11)

分光の結果、Pa β (1.28 μ m) が確認されたが、その他の line らしきものは確認されなかった。line 幅は観測装置の調整不良により、大きく広がっている。

9) Quasar 1225+317, 1358+115

1225+317 (z=2.219)

H band 撮像	30 sec x 2	: H = 13.87	(図12)
分光	240 sec x 4	: (図13)	

この object は比較的よい状態で観測することができたが、Mask pattern や bad pixel 等の影響により、理論的な S/N を得られてはいない。このスペクトルには line らしきものはなく、凹凸は hot pixel 的なものか解析上発生したものである。これに関しては、後に詳しく考察する。

1358+115 (z=2.571)

H band 撮像	60 sec x 4	: H = 13.90
分光	240 sec x 3	: (図14)

この object は4回の分光観測をしたが、望遠鏡の tracking が徐々にずれてしまったので、全体的には1回強の積分に相当する信号しか得られていない。また、filter を替えた直後の frame でもあったので検出器が安定しておらず、S/N の悪い data となってしまった。(H band でほぼ同じ明るさの 1225+317 と比較すると S/N がかなり悪いことが分かる。

10) Supernova in NGC3690 (z=0.011)

H band 撮像	60 sec x 2	: H=15.98	(Supernova)] (図15)
		: H=11.67	(NGC3690 中心核6" φ)	
J band 撮像	60 sec x 1	: J=16.40	(Supernova)	
		: J=13.37	(NGC3690 中心核6" φ)	
分光	240 sec x 2	: (図16・17)		

Supernova は NGC3690A (東側の spiral galaxy) の中心核の南1.5" 西1.5" の地点にあり、60 sec の積分1回で場所が確認できたので分光観測をした。観測は 240 sec の積分2回と sky の積分1回を1組として2組の観測を行なったが、1組目は検出器の読みだし系統に異常があったのと filter 交換後の不安定が重なり、良い data ではなかった。最終的に使用しなかった。NGC3690A に関しては slit が南北方向以外に向けられない事もあって、中心核の1.5" 東の分光 data が得られた。Paβ他、H band に数本の line が確認されるが、これらは Mask pattern である可能性もある。

11) dark level の変化と各 pixel の性質

図18は1回の積分時間 200 sec で mosaic 観測をしていた時の典型的な pixel の出力の値の時間変化をグラフに表したものである。これを見ると判るように正しい値を出力していた pixel が、突然異常な値を出力することがある。この現象を調べるために個々の pixel に対し、13回の連続した出力の標準偏差を調べた。その結果、ほぼ全ての pixel で $\sigma < 1.0$ ADU であったが、bad pixel として登録されているものを除いた残りの pixel の約1%にこのような現象があることが認められた。 σ の値に対して5段階に level を分けて結果を次表に示す。

level	σ	N
1	> 10	586
2	> 20	343
3	> 80	87
4	> 200	31
5	> 400	12

図18に示されているものは level 1に相当するものであるが、実際には、これよりも小さい異常も分光 data の S/N を悪くする原因となっている。

考察 : 今回の試験観測において、OHSの効率は約30%、夜光除去率は約1/17であった。この場合、観測の際のノイズ源となるバックグラウンドの内訳をH band について考えてみると、

主鏡直径	: Dt = 220	cm
1 pixel あたりに入射する光の波長幅	: $\Delta\lambda = 0.3$	μm (測光時)
	: $\Delta\lambda = 0.0165$	μm (分光時)
1 pixel あたりの視野	: $\theta = 0.752$	arcsec
OH夜光強度	: FOH = 30000	photons/sec/m ² / μm /arcsec ²
OH夜光除去率	: R = 1/17	

System 全体の効率 : $\varepsilon = 0.045$

1 sec あたり 1 pixel に入射する OH 夜光の量は

$$\begin{aligned}
 : N_s &= F_{OH} \times \pi \times (Dt/200)^2 \times \Delta\lambda \times \theta^2 \times R \times \varepsilon \\
 &= \frac{5.1}{2.8} \quad \begin{array}{l} \text{photons/sec/pixel} \quad (\text{測光時}) \\ \text{photons/sec/pixel} \quad (\text{分光時}) \end{array}
 \end{aligned}$$

また、NICMOS camera 直前の状態は黒体であるとみなすと

$$\begin{aligned}
 \text{波長} &: \lambda \quad \mu\text{m} \\
 \text{温度} &: T \quad \text{K} \\
 \text{熱輻射量} &: b = 11910 / \lambda^5 / \exp(14387 / (\lambda T) - 1) \\
 & \quad \text{W/cm}^2 / \mu\text{m/Sr}
 \end{aligned}$$

1 pixel あたりの視野×集光面積は最終 f 比と pixel の大きさのみによって決まるので

$$\begin{aligned}
 : S\Omega &= \pi \times (Dt/2)^2 \times (\theta/3600/180 \times \pi)^2 \\
 &= 5.053 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \text{ Sr}
 \end{aligned}$$

1 sec あたり 1 pixel に入射する thermal photon 数は、

$$\begin{aligned}
 \text{プランク定数} &: h = 6.626 \times 10^{-27} \text{ erg sec} \\
 \text{光速} &: c = 2.998 \times 10^{10} \text{ cm/sec} \\
 \text{photon 数} &: N_t = \int (b \times 10^7 / (hc/\lambda)) d\lambda \times S\Omega \\
 & \quad \text{photons/sec/pixel}
 \end{aligned}$$

(積分区間は 1.5 ~ λ_{\max} μm)

N_t の計算結果を次表に示す。

T	λ_{\max}		
	1.9	1.8	1.7
283	85	21	2.4
273	31	7.3	1.4
263	10	2.3	0.42

測光の場合、除去されなかった OH 夜光の量は 5.1 photons/sec/pixel であったので、H band (1.5 ~ 1.8 μm) 測光の場合はあまり問題とはならないが、分光の場合は夜光の量は 2.8 photons/sec/pixel となるので、1.7 μm すぎ辺りで熱輻射を除外しないと熱輻射が夜光を上回ってしまう事になる。今回用いた filter は 1.9 μm で遮断するものであり、これによるノイズが大部分を占めていたようである。1.9 μm cut off filter を用いた場合、検出器の dark current は約 2 ADU/sec であったが、1 ADU = 2.3 e^- なので、この計算結果とほぼ consistent である。また、H filter の場合 dark は 0.7 ~ 1 ADU/sec であり、この計算結果よりも大きい値を示しているが、1.8 ~ 2.5 μm で filter に 0.1% の漏れがあるとすると、その量は 1.4 photons/sec/pixel となるのでこれが原因であったと考えられる。しかし、H filter は分光の際には用いないので、現在のものを用いても問題ないと思われる。

また、分光 data の S/N を悪くしている原因に、bad pixel 補正の方法と Mask pattern の影響がある。OH 夜光を取り除くための mask の溝は、分光観測の際に分解しきれない多数の影をつくる。その結果、全ての分光観測 data に OHS 特有の凹凸パターンが現われるのである (図 19)。この Mask pattern は、object のスペクトルを標準星のスペクトルで割ることにより取り除くことができるが、その際 1 pixel 以下の僅かなずれでも最終的なスペクトルに凹凸が現われてしまう。今回の解析では、0.1 pixel の単位で 2 つのスペクトルをずらして割ることにより、最適な場所を探した。しかし非常に明るい object に対しても、完全に Mask pattern を取り除くことはできなかった。その原因として次の 4 つが考えられる。

① bad pixel との関係

bad pixel の補正はその pixel をはさむ上下もしくは左右の pixel を平均化する事により行なわれるが、上下の pixel を用いて平均化した場合、空間方向 (分散に対し垂直方向) での object の形状が完全には再現されず、左右の pixel を用いた場合には、分散方向で Mask pattern の形状が再現されないという問題がある。この影

響を最小限にするため、bad pixel の補正をする前に1次元化された標準星のスペクトルによる Mask pattern を空間方向に引き延ばした2次元の frame で割り、ある程度 Mask pattern を取り除いておいてから、bad pixel の補正を空間方向に平均化する事により行い、再び2次元化された Mask pattern を掛けてから object のスペクトルを1次元化するという方法をとった。(一時的に Mask pattern を取り除くこの方法では、1 pixel 以下のずれを合わせることができないので、一度割った frame をまた掛けて元に戻し、1次元化してから微量の調整を行なった。)この方法は、一時的な Mask pattern の補正が的確である場合には有効であるが、そうでない場合あまり有効な手段ではない。

② 空間方向の位置の違いによる Mask pattern の変化

これに関しては、今回の data では確認をする事はできないが、mask の幅の変化、mask の edge の部分がなめらかでなく光る部分があること、mask 内部の黒色塗料の均一性、等が原因で空間方向の Mask pattern に変化が生ずることは十分考えられる。次回の観測では、このことを検査するため dome flat を実際の観測と同じ状態で分光する事が必要である。

③ Mask pattern と pixel の関係

Mask pattern は場所により、かなり激しく強度が変化している。強度変化の極大・極小となる部分で、それが幾つの pixel にまたがっているかでその部分の pattern が微妙に変化する。解析のある段階で3 pixel の smoothing を掛けているのでこの影響が最後まで残っているとは考えにくい、細かい凹凸として残っている可能性はある。今回の観測は NICMOS camera を2:1の光学系で用いたので、Mask pattern について荒い情報しか得られていないが、1:1の光学系を用いれば情報量が増え、この効果は少なくなるものと考えられる。

④ slit 中での参照星の位置による Mask pattern の変化

slit はほとんどの観測で500 μm (1.5") のものを用いていたが、幅の狭いものを用いれば、夜光除去率と最終的な波長分解能が上がり、Mask pattern は凹凸の激しいものとなる。slit 中に参照星がすべて入っている場合と slit の端で半分隠されている場合には、slit 幅が変化したような効果が現われる可能性があり、それにより Mask pattern に違いが生じる事が考えられる。この効果は、参照星のような point source と galaxy の様な broad source (quasar でも tracking が悪ければ広がったものと考えられる) との間にもあると考えられるが、どの程度の影響を及ぼしているかは不明である。次回の観測では積分中に星を動かしたものと、動かさなかったもの、slit 中央に写っているものと半分隠れているもの、等を slit の同じ部分を用いて観測し、比較してみる必要がある。

この他にも、一時的に発生する bad pixel や巨大な bad pixel 領域、column 128 の読み出しがずれていること、観測中の夜光強度の変化と slit と mask の傾きの微妙な違いによる空間方向での夜光除去率の変化などが、特に長時間の積分の際には大きく影響し、観測 data の S/N を低下させる原因となっている。

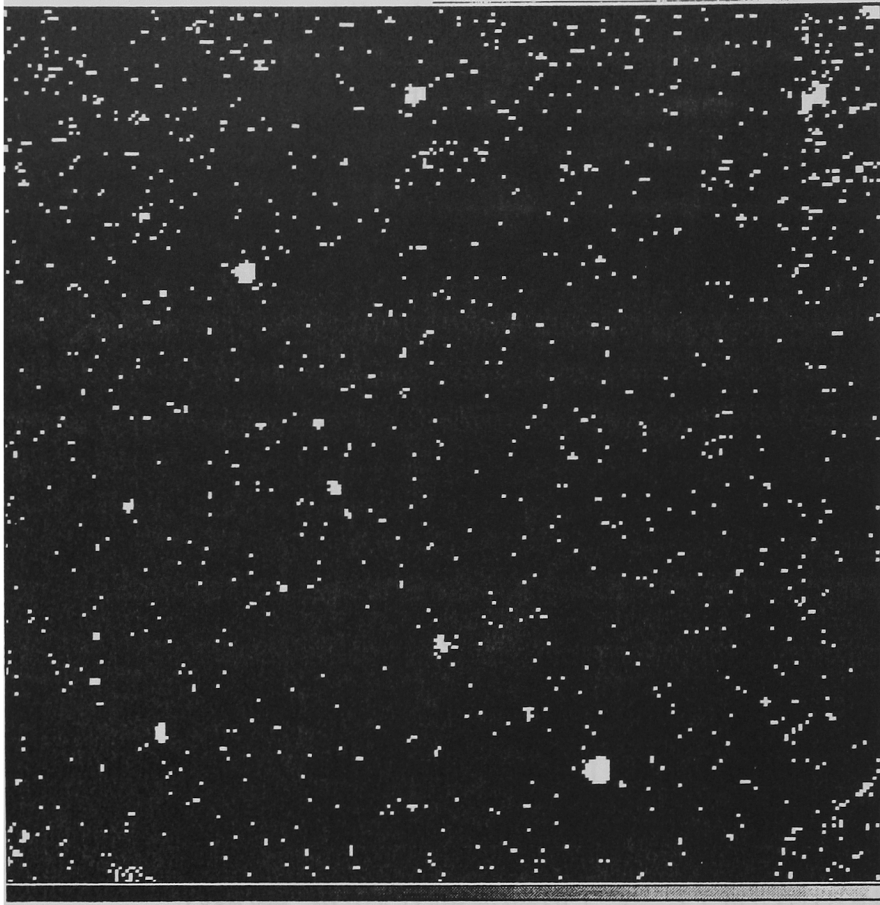


図1 bad pixel frame

図の白い部分が bad pixel
detector 全体の 2.62% を占めている。
この他にも一時的に bad pixel となるもの
があり、それらの補正は手作業で行なう。

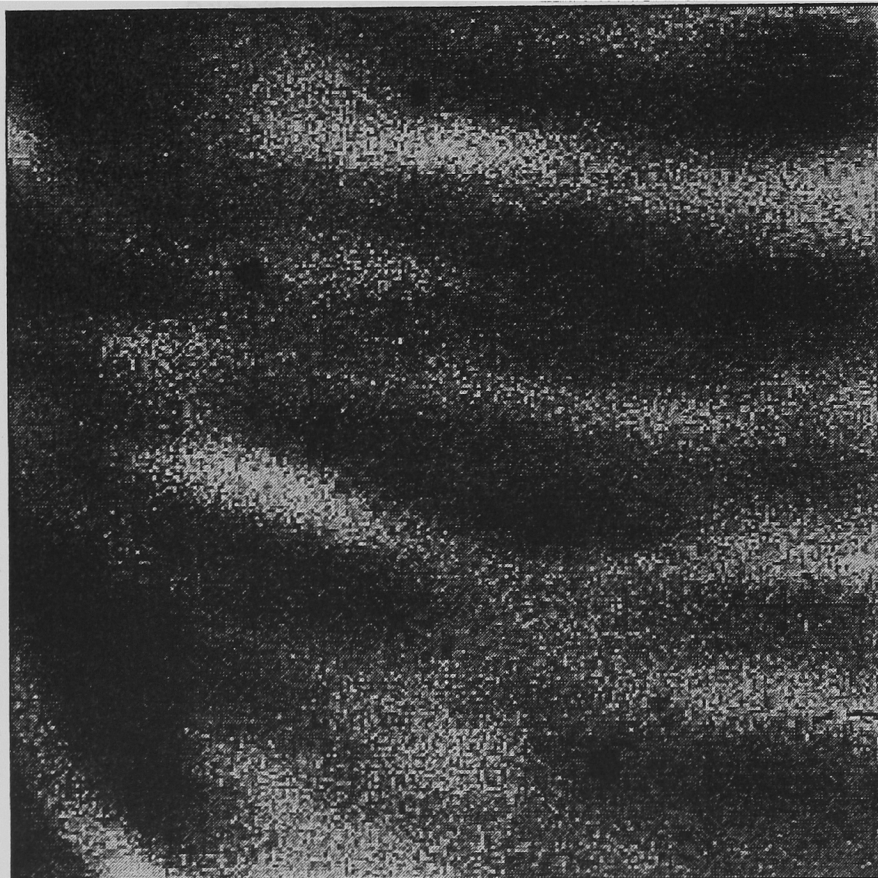


図2 standard flat frame

数多くの flat frame の中から比較的標準的
だと思われる 6 枚の平均をとったもの。やや
感度のよい部分で normalize してある。最も
白い部分は 1.2 以上、最も暗い部分は 0.6
以下である。

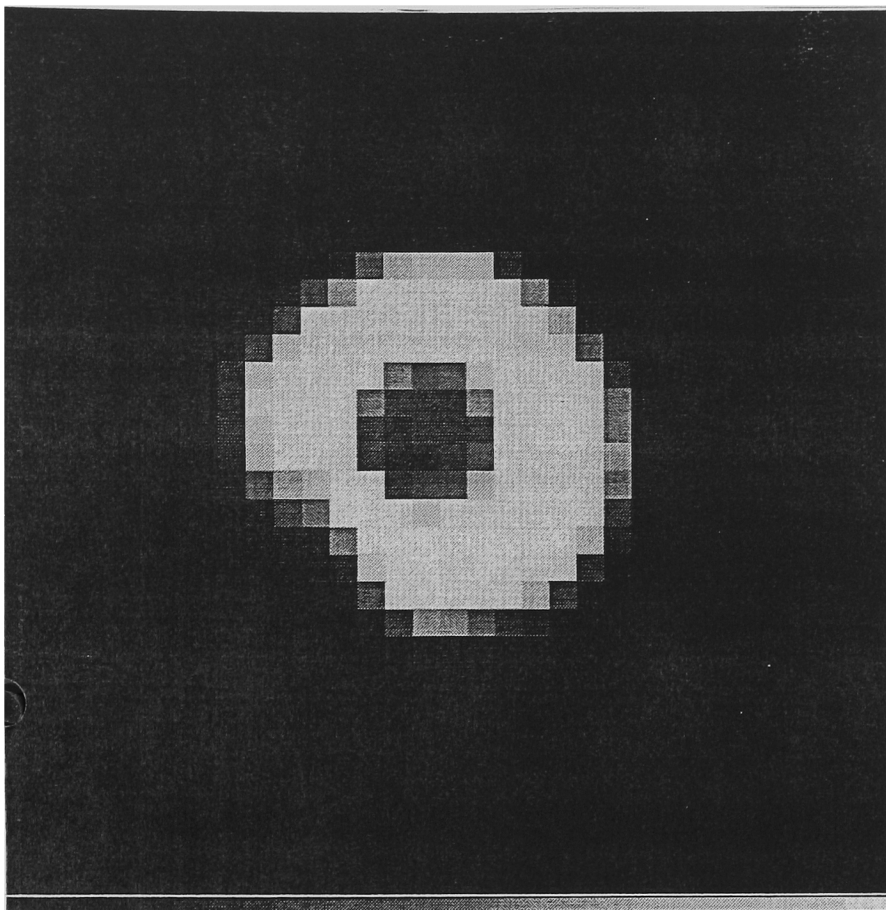


図3 f/31 人工光

OHSを通して f/31 の人工光を焦点をずらして測定したもの。中央の穴は NICMOS camera の cold stop、左下の欠けている部分はレーザーホルダーの影である。

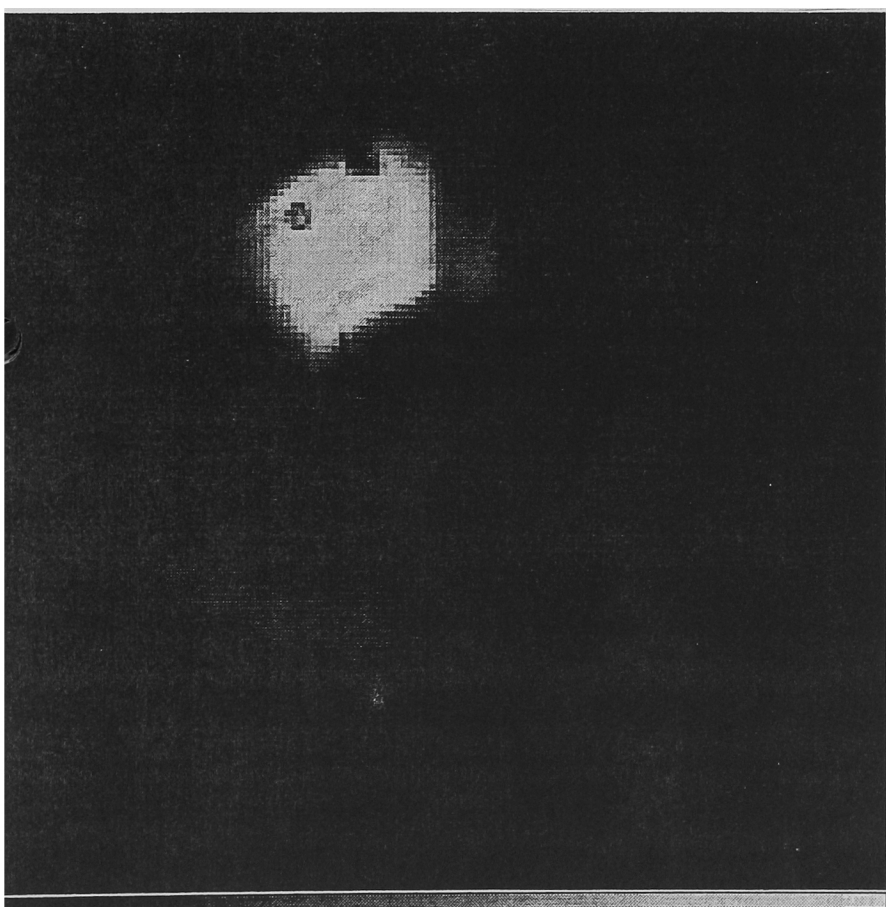


図4 f/31 人工光

f/31 の人工光を直接入射させたもの。

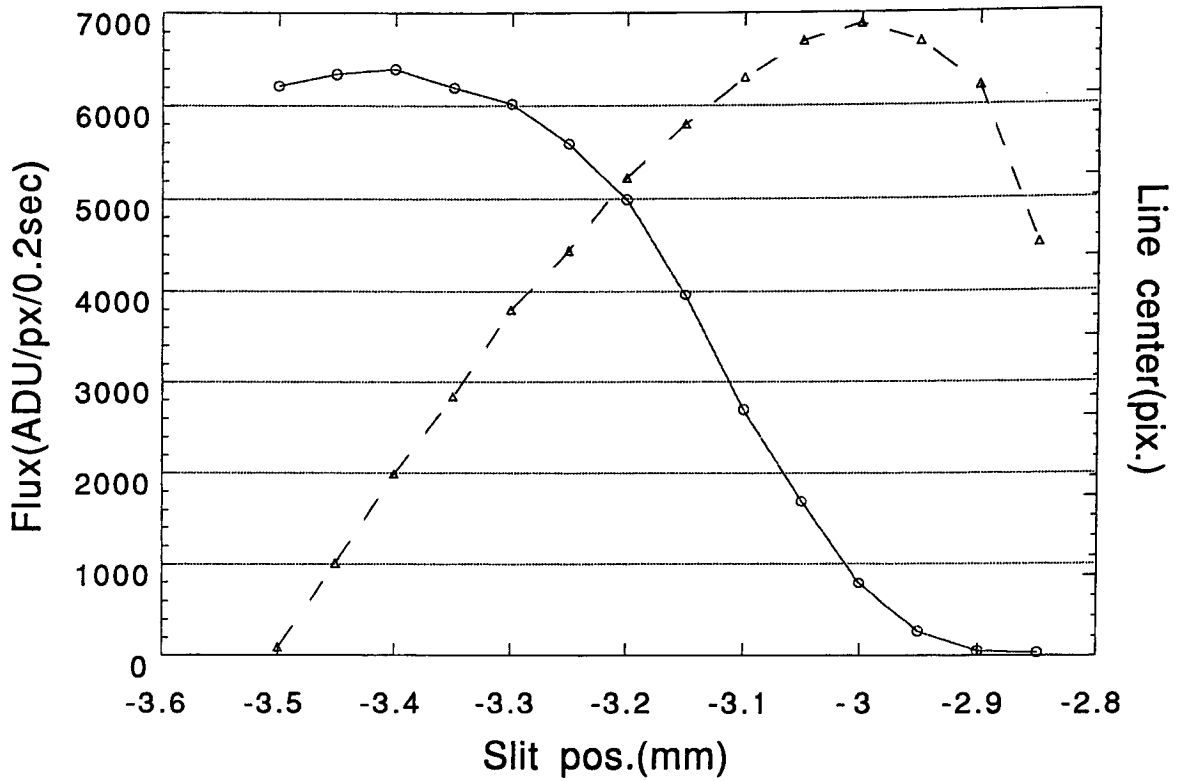


図5 slit を移動させたときのある Ar line の強度変化
 実線は line 強度で、破線は line の中心の移動量を表している。line が隠れていくに従って、強度が減り中心の移動量が減っていくことがわかる。

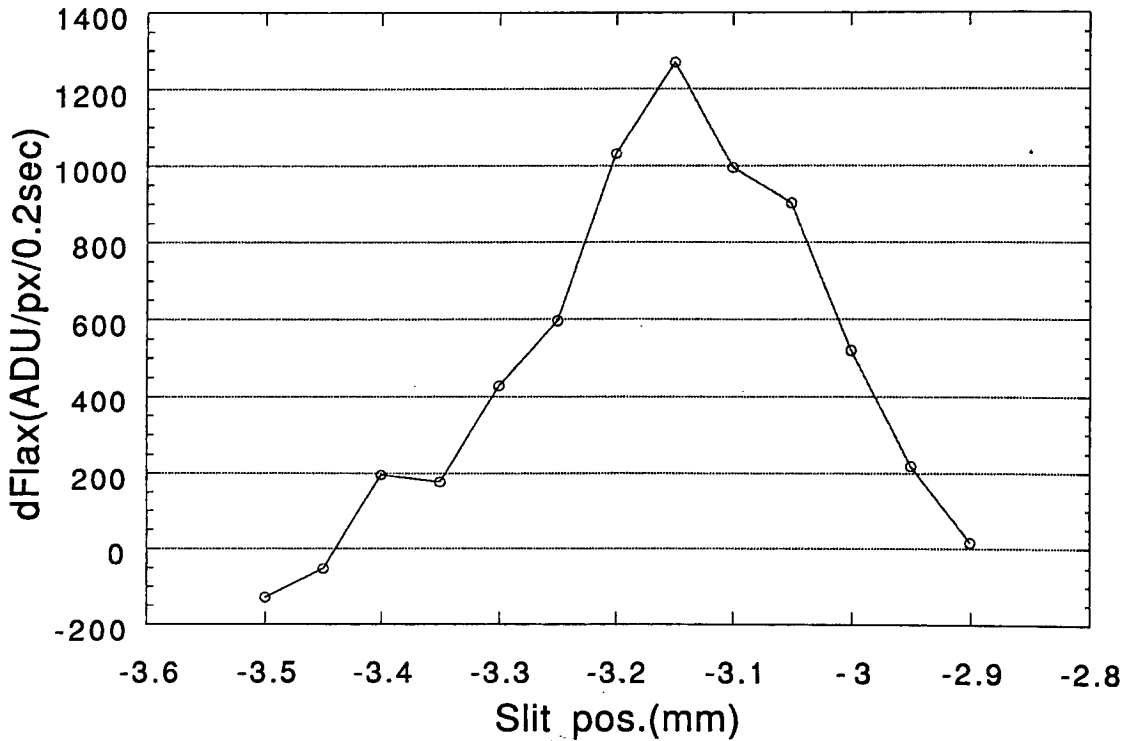


図6 line 強度の変化率
 図5の強度の変化率をグラフにしたもの。slit の移動量は Mask mirror 上では半分になるので、Mask mirror 上での slit image の全幅は $250 \mu\text{m}$ であることが判る。

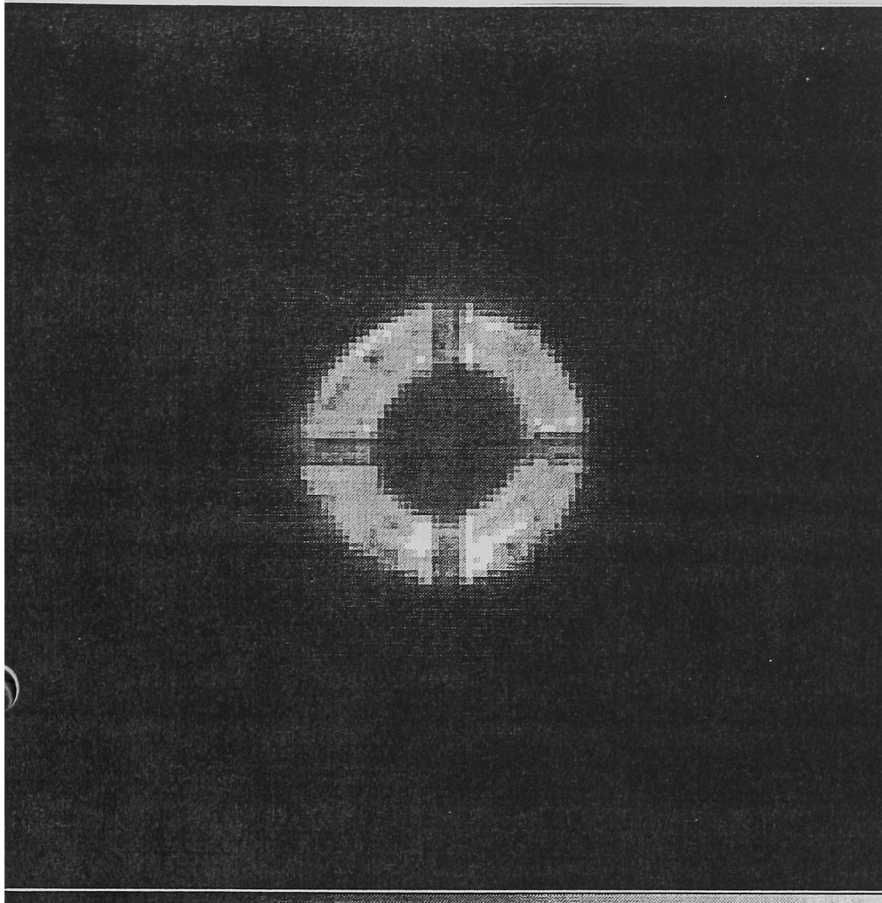


図7 焦点面外での星像

望遠鏡・OHS・NICMOS camera の光軸を一致させるためにこのような像を調べ、光の損質が無いことを調べた。

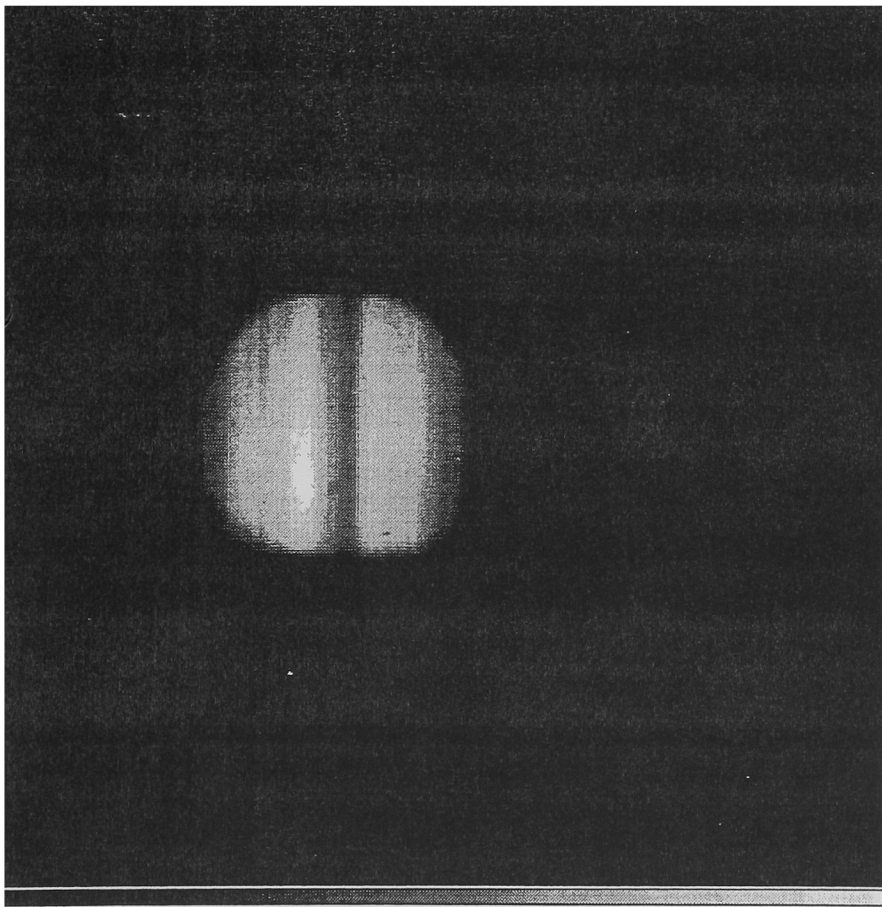


図8-a Mask mirror 調整前のsky

Mask mirror が正しい位置にないと、分散度と夜光除去 mask が一致せず、夜光が除去されない。

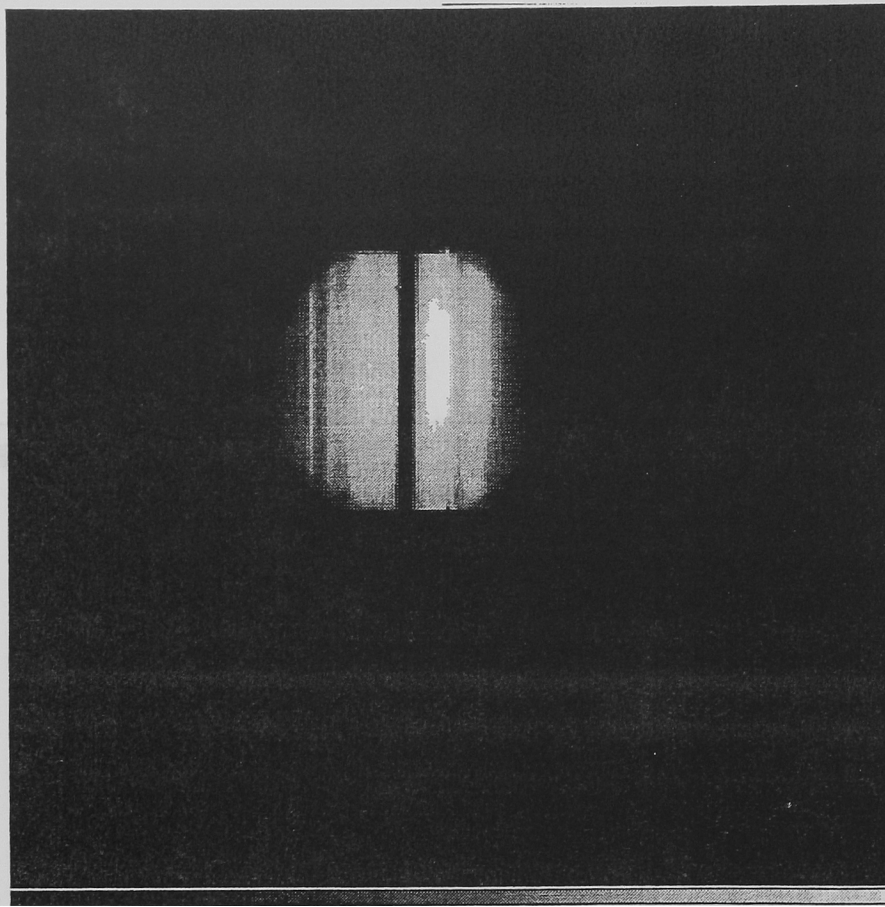


図8-b Mask mirror 調整後のsky

Mask mirror を前後に動かして調整をするとこのように夜光の除かれた部分がはっきりと現われる。中央の暗い部分に slit を合わせると、明るい周辺部からの散乱光がなくなり中央部は更に暗くなる。

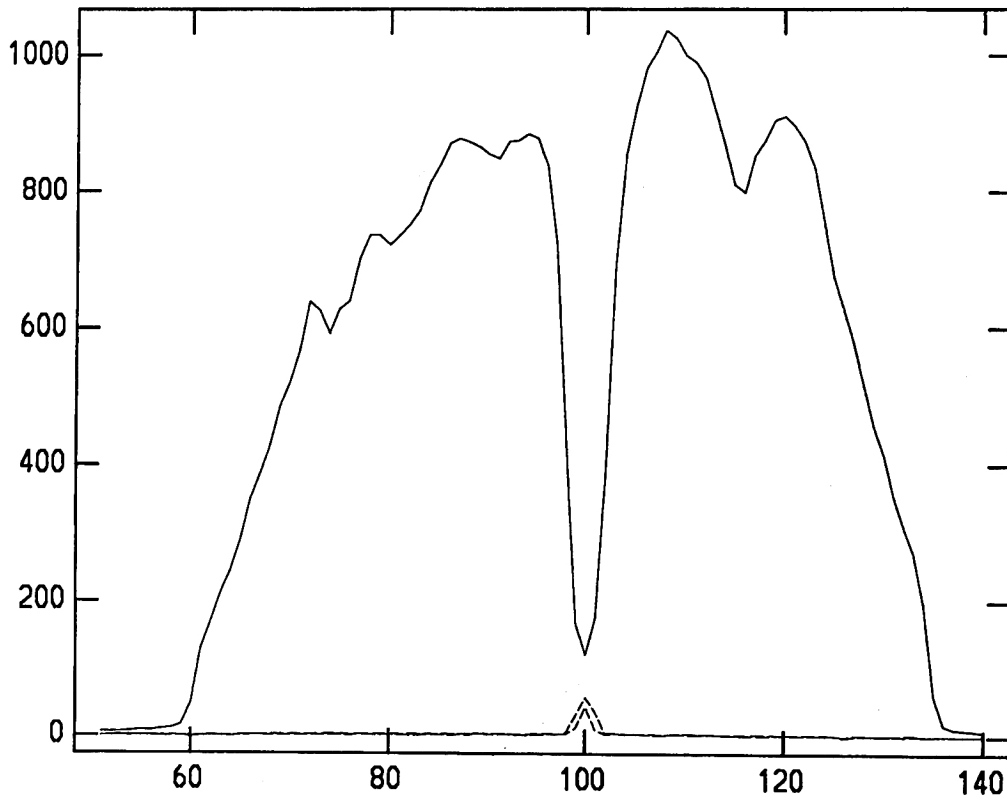


図9 sky frame の断面

図8-bの断面を表したもの。破線は中央に $500\mu\text{m}$ 、 $300\mu\text{m}$ の slit を移動させた時のskyの明るさを表す。 $500\mu\text{m}$ を用いた場合 $1/17$ 、 $300\mu\text{m}$ を用いた場合 $1/22$ にskyの明るさを抑えることができる。

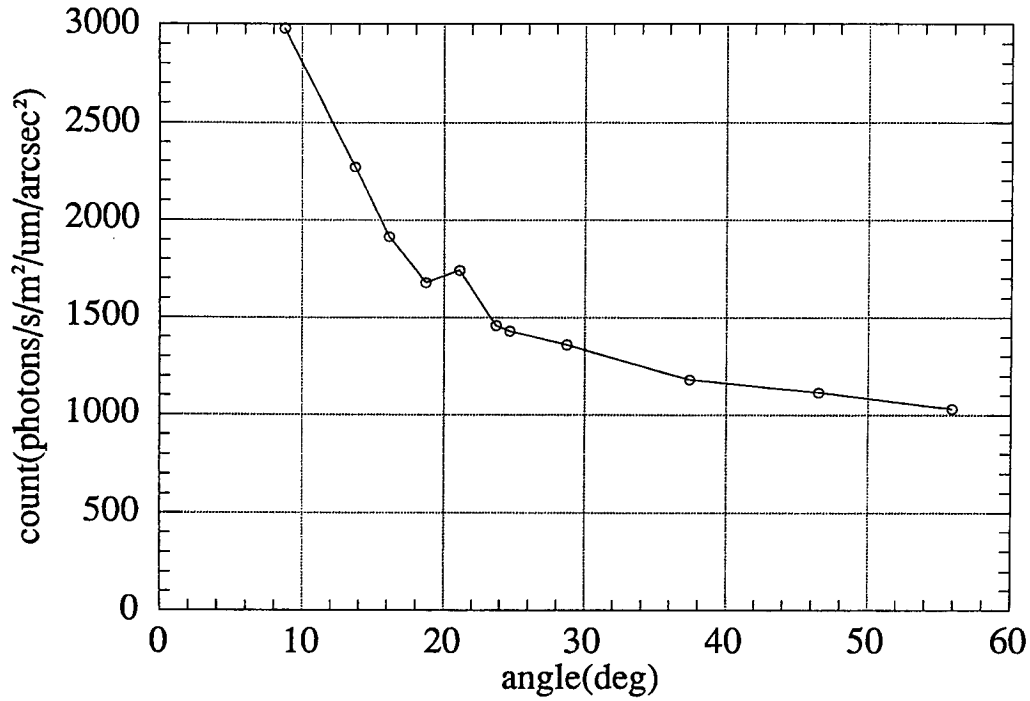


図10 月からの角度とskyの明るさの関係
 OH夜光を除去しない限り、月の明るさは赤外では問題にならないが、夜光を除去すると月は観測にかなりの影響を与えることが判る。観測の際には月から40°以上離れることが必要である。

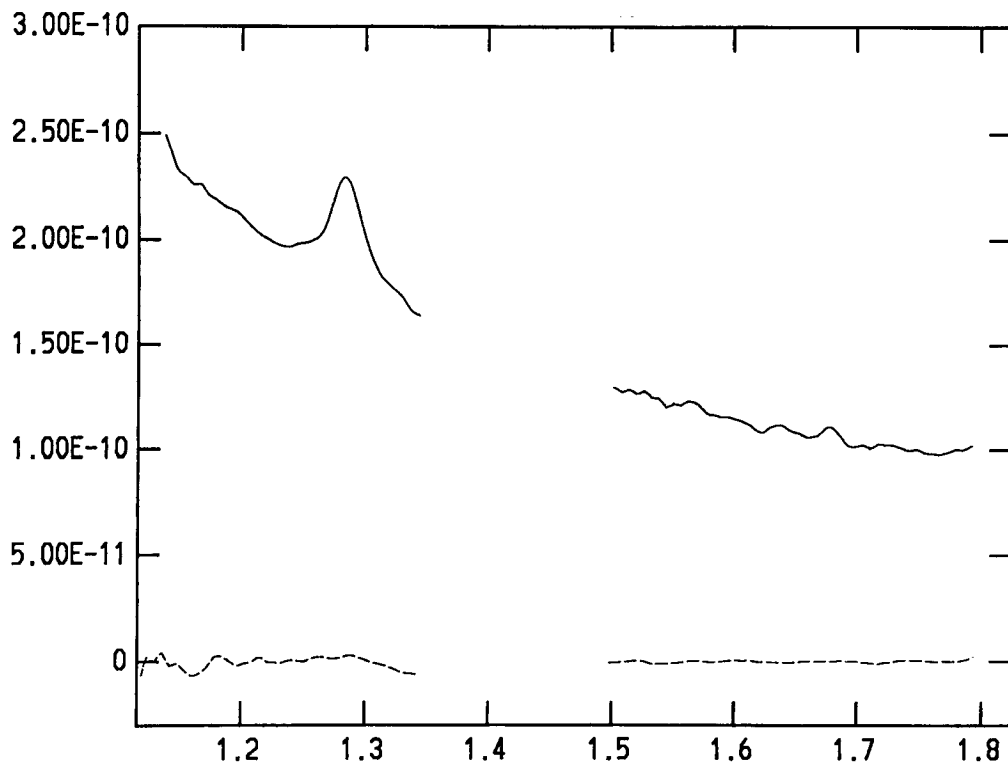


図11 Seyfert1 NGC4151 (z=0.00324) のスペクトル
 縦軸は flux (erg/s/cm²/μm) 横軸は静止波長 (μm) で、破線はskyを表す。
 Paβ (1.28 μm) は装置の調整不良により大きく広がっている。

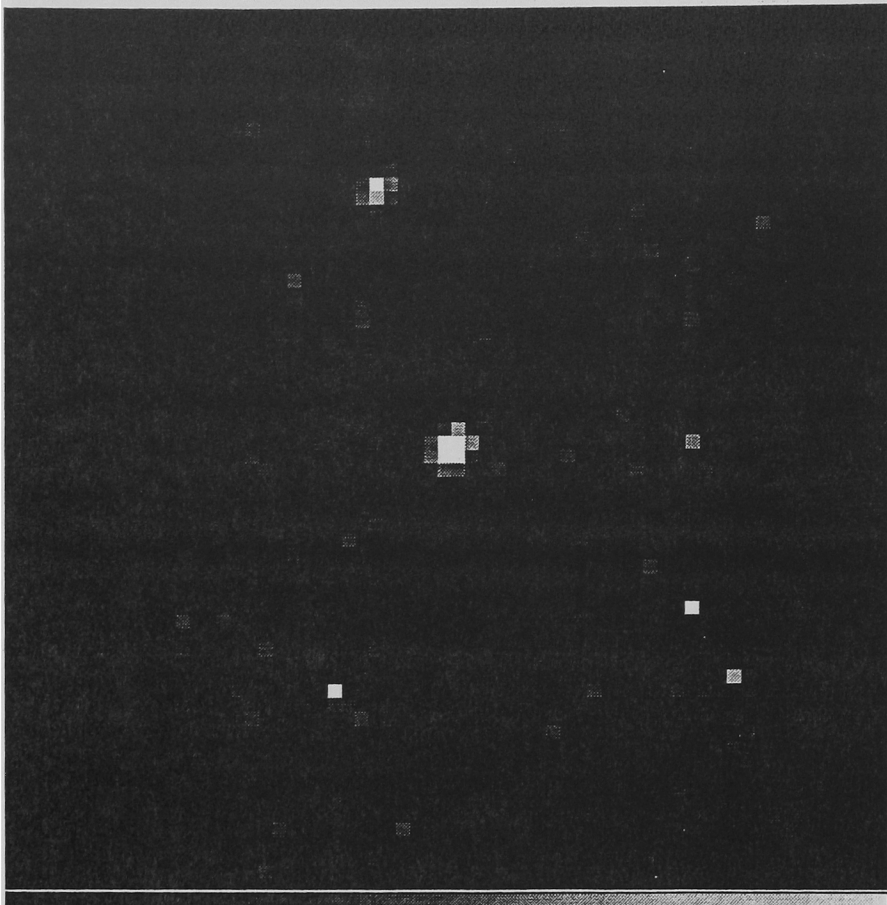


図12 Quasar 1215+317

1225+317 をH band の撮像 mode で撮ったもの。H等級は13.87magであった。

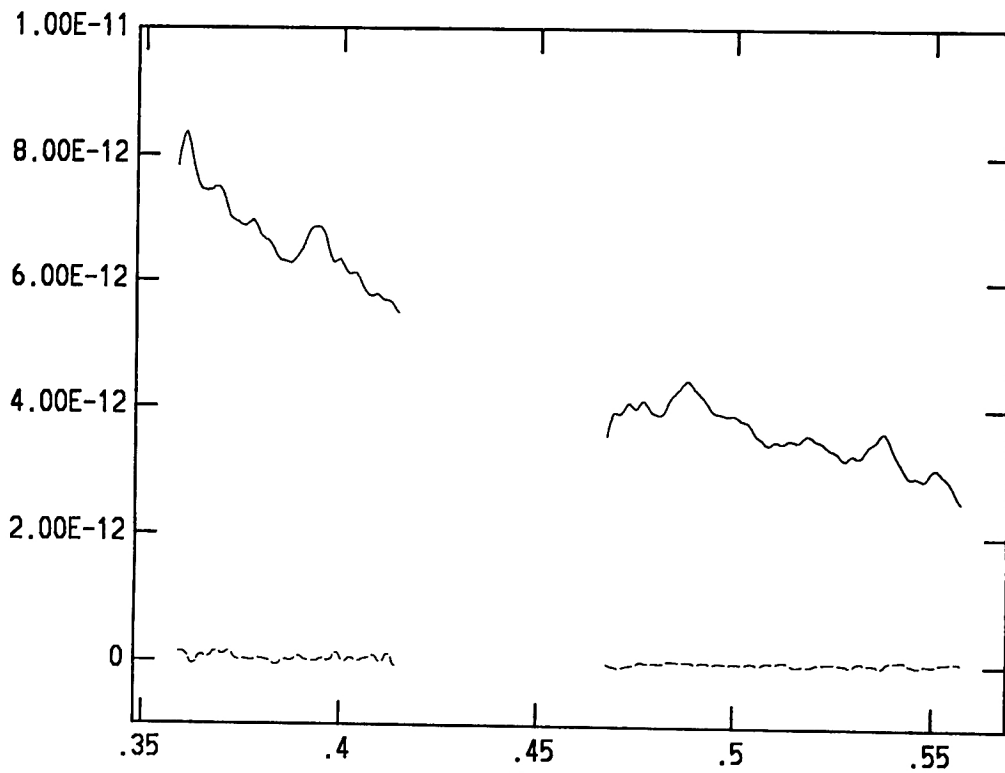


図13 Quasar 1225+317 ($z=2.219$) のスペクトル
縦軸は flux ($\text{erg/s/cm}^2/\mu\text{m}$) 横軸は静止波長 (μm) で、破線は sky を表す。
この Quasar は自己吸収が大きく line は見えていない。

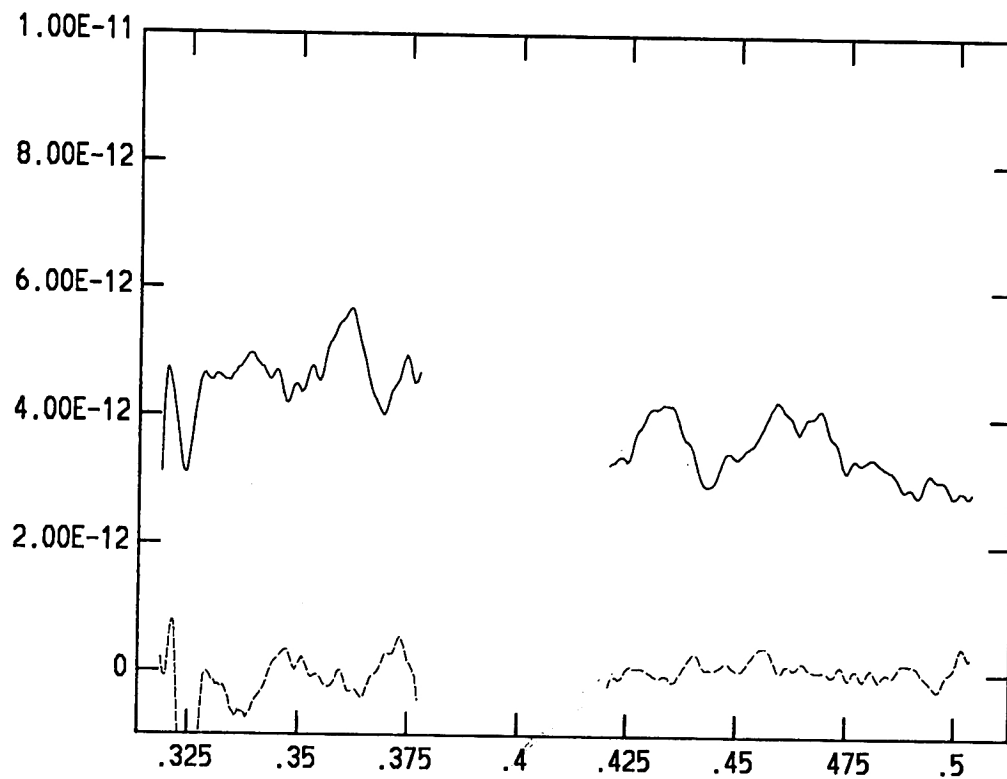


図14 Quasar 1358+115 ($z=2.571$) のスペクトル
 縦軸は flux ($\text{erg/s/cm}^2/\mu\text{m}$) 横軸は静止波長 (μm) で、破線は sky を表す。
 この Quasar は観測状況が思わしくなく、S/Nが非常に悪い。1225+317 よりも吸収が
 大きいようである。

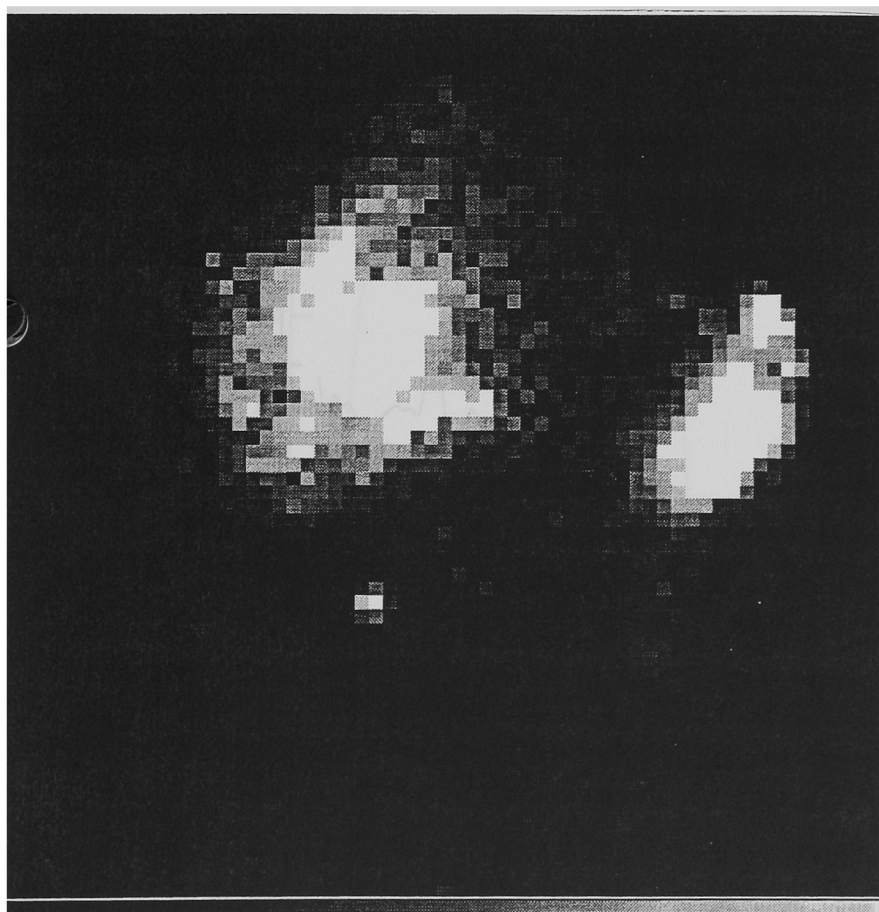


図15 NGC3690 と Supernova

NGC3690 を J band の撮像 mode で撮ったもの。
 NGC3690A (東側の spiral galaxy) の西 $1.5''$
 南 $1.5''$ に Supernova があるのが判る。Super-
 nova の明るさは、Jで 16.40 mag 、Hで
 15.98 mag であった。

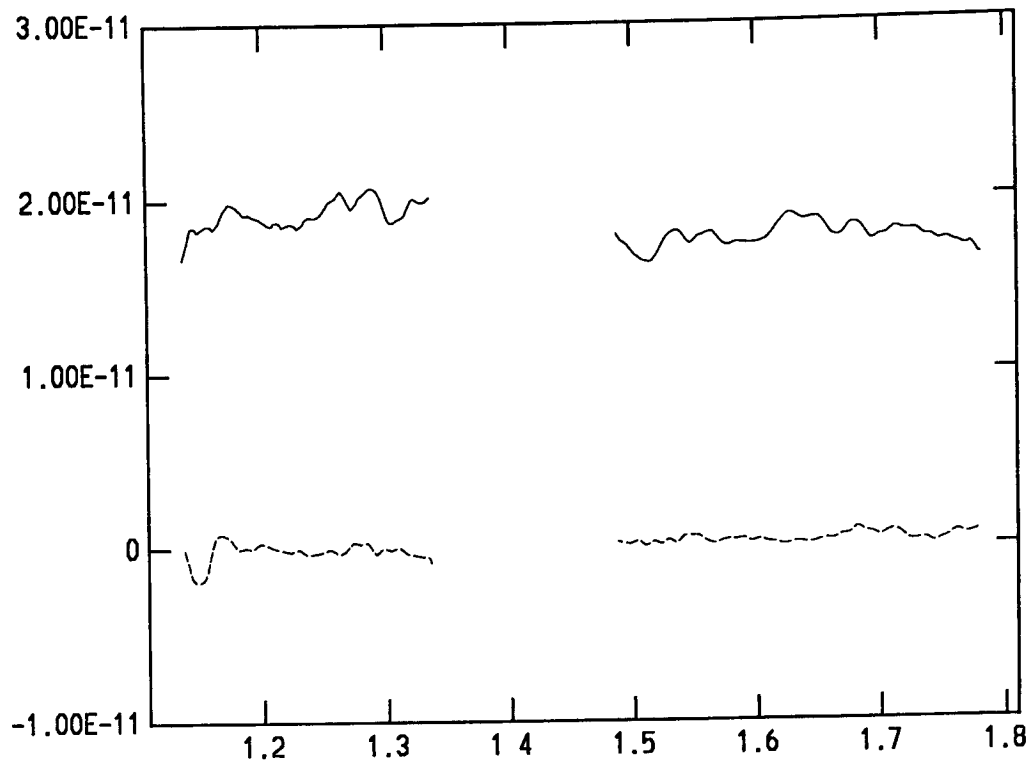


図16 NGC3690A ($z=0.011$) のスペクトル
 縦軸は flux ($\text{erg/s/cm}^2/\mu\text{m}$) 横軸は静止波長 (μm) で、破線は sky を表す。
 中心核の西 $1.5''$ の部分を分光したもの。Pa β 他、H band に数本の line らし
 きものが確認される。

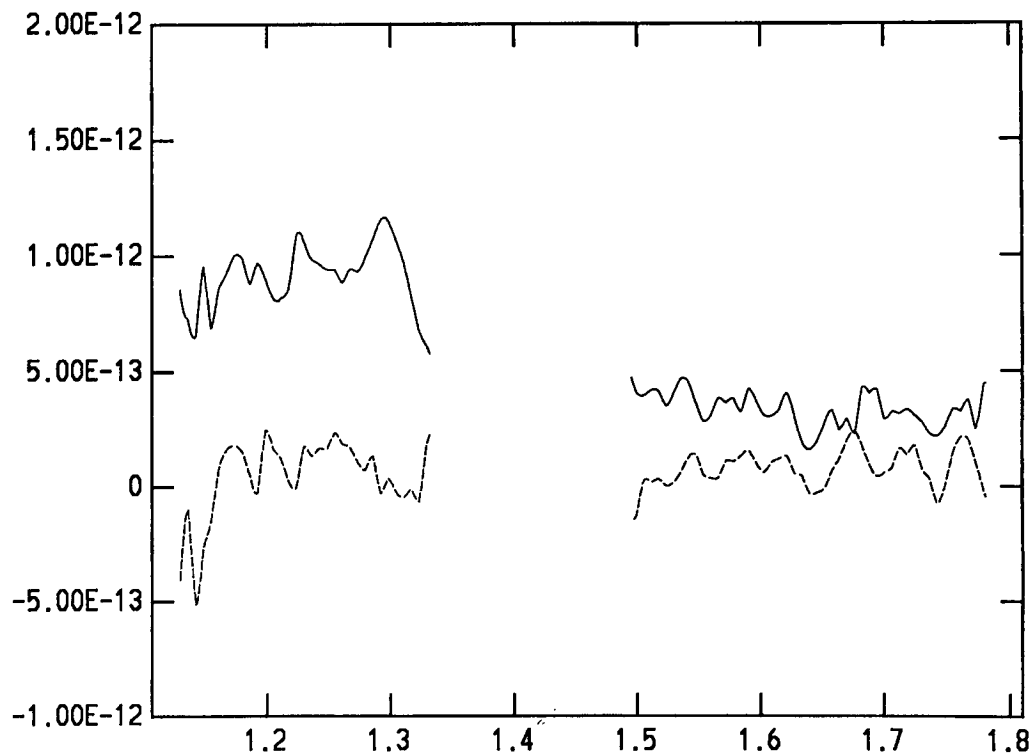


図17 Supernova のスペクトル
 縦軸は flux ($\text{erg/s/cm}^2/\mu\text{m}$) 横軸は静止波長 (μm) で、破線は sky を表す。
 S/N が悪すぎてよく判らないものとなってしまった。解析にもやや問題があるようだ。

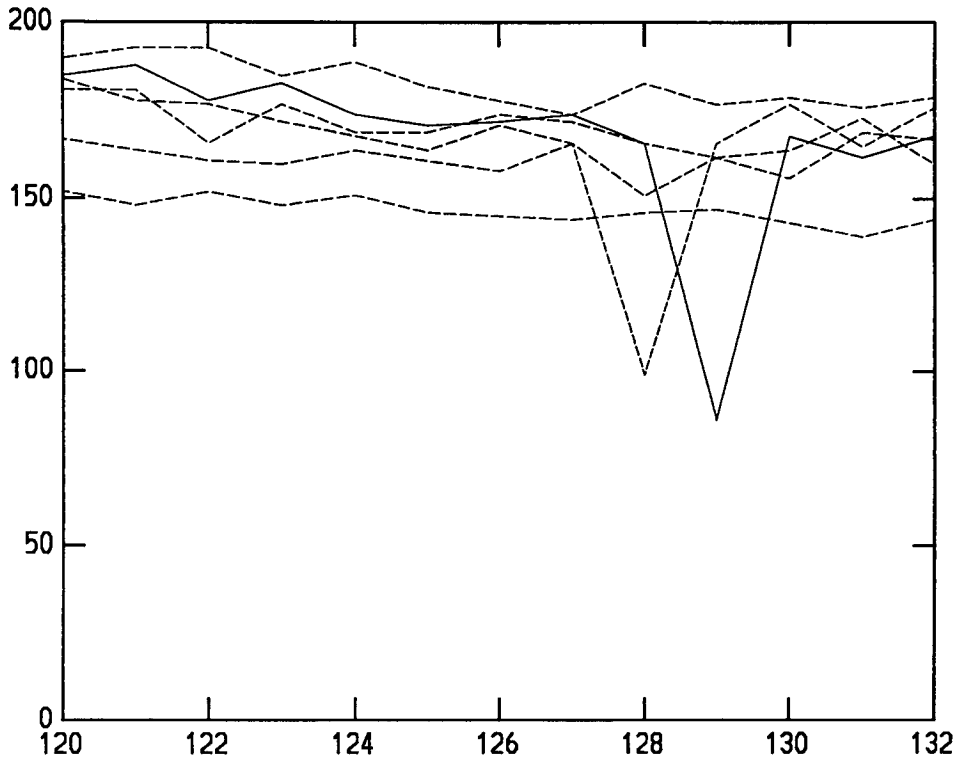


図18 一時的な異常出力
 縦軸は出力 (ADU) 横軸は時間 (200 sec 単位)
 200 sec x 13 回の連続した data から同じ pixel の値だけを取り出して並べたもの。
 正常な値を出力していた pixel が突然乱れることがある。

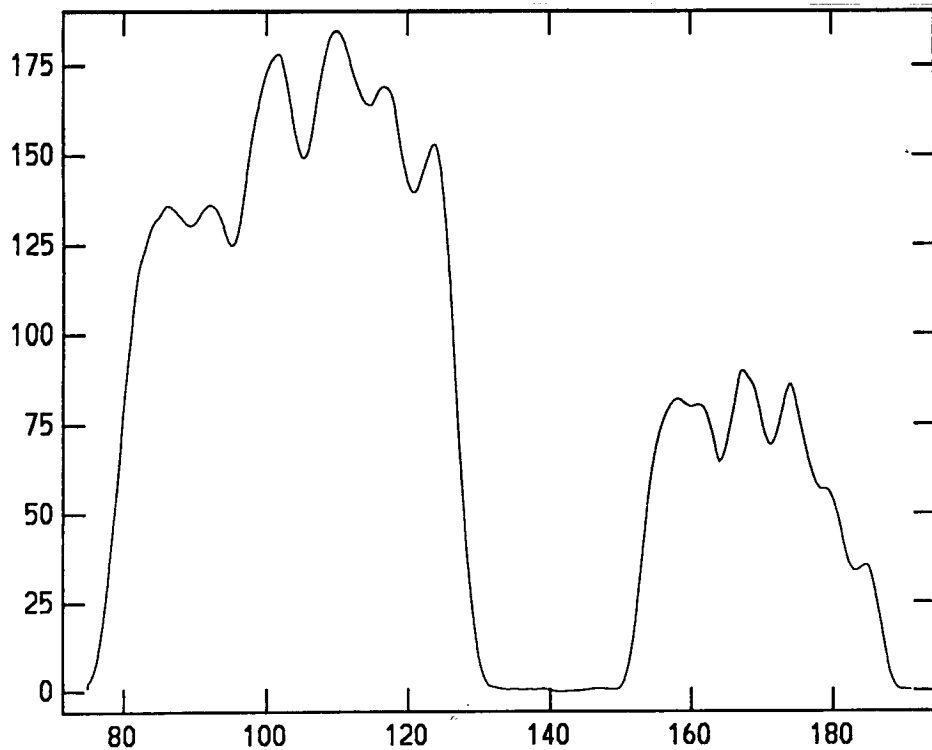


図19 Mask pattern
 縦軸は強度、横軸は column 番号
 標準星のスペクトルを1次元化し continuum の傾きを修正したもの。smoothing が
 かけてある。

A p p e n d i x E .
第三回観測結果

観測日時 : 1993年10月13日~22日
 観測場所 : ハワイ・マウナケア山
 観測装置 : UH88 (カセグレイン焦点) + OHS + NICMOS3 camera

観測概要 : 今回の準備期間は5日間であったが、新しいミラーの取り付けから基本的調整・測定まで実質4日間で終了し、13日から観測を行なった。全10日間の観測日の内、初日と9日目は天候は良好であったが、3日目・4日目は悪天候により観測できず、他の6日間も high cloud や高い湿度のため半分程度の時間しか観測できなかった。また、悪天候となった3日目に thermal cutoff filter の交換 (1.7 um cutoff filter を wheel Bに移動し、1.9 um cutoff filter を wheel Aに追加) を行い、分光観測の際には2枚の filter を同時に用いて熱輻射を抑えた。観測した天体は PHL957, High-z starburst galaxy, MG 0414+0534 の他、SHAH35, ARP298, 0528-250 などであるが、観測 data の一部が (1~3日目の分) テープに記録されていなかったため、PHL957, MG0414+0534 の観測の一部と、Ar lamp による mask scan の測定 data が失われた。

解析手順 : 解析は以下の手順で進めた。
 1) bad pixel mask の登録と dark current の検査。
 2) standard flat image の作成。
 3) system 全体の効率検査。(standard star)
 4) 光軸の調整。(bright star)
 5) 夜光除去率の検査。(sky)
 6) mask pattern
 7) MG 0414+0534
 8) High-z starburst galaxy
 9) Mosaic Operation の精度と課題
 以下、順を追って解説する。

1) bad pixel mask の登録と Bias, Dark, Thermal 量の評価

今回の観測で得られた Bias, Dark, Thermal frame (図1) を調べ、NICMOS-3 および filter の性能評価を行った。調査した frame 数は以下の通り。(詳細は別紙参照)

Bias 26 frames (積分時間 0.1-2 秒)
 Dark 25 frames (積分時間 2 秒以上のもので Blank で露出しているもの)
 Thermal 64 frames (積分時間 2 秒以上のもので slit close で露出しているもの)

Count 数の評価はヒストグラム (imhist) を用いて行い、mode (最頻値) を目測により読み取り、記録した。また、その際 Bad pixel mask (分布の両端部分を1、中央部分を0に置き換えた frame) を1 frameにつき1枚作っておき、最終的にそれらを重ね合わせ、全 frame 数の1割以上の回数 Bad pixel mask に登録された pixel を Bad pixel として定義した。Bias, Dark, Thermal 量の評価は以下の通り (multiple sampling による結果は sample 回数で割った値を用いている)。

Bias	F6	2 ADU	46 electron	
	F9 (8)	6 ADU	138 electron	
	F9 (16)	9 ADU	207 electron	
Dark	H Blank	10 ADU/240sec	0.96 electron/sec	計算値 (273 K)
	J Blank	7 ADU/240sec	0.67 electron/sec	
Thermal	H Open	45 ADU/240sec	4.3 electron/sec	3.5 electron/sec
	H 1.7	15 ADU/240sec	1.4 electron/sec	0.98 electron/sec

	1.9 1.7	1.9 ADU/240sec	1.8 electron/sec	0.99 electron/sec
	J Open	5 ADU/240sec	0.48 electron/sec	0.00 electron/sec
	J 1.7	5 ADU/240sec	0.48 electron/sec	0.00 electron/sec

Bias が sample 回数によって異なるのは、読み出し時の発光が原因で、detector 中央付近もかなりの影響を受けていることが分かる。また、16 回の読み出しには十数秒かかり、この間にたまる Thermal 成分もわずかながら含まれている。

Dark current は J Blank で測定された 0.7 electron/sec が標準的な値であると考えられ、H Blank で測定された超過分 3 ADU/240sec については、H filter を通過した光の 7 %程度が Blank の横を通過し漏れ込んでいるか、測定日の違いにより素子の状態が変化して生じた差である可能性が考えられる。次回の観測では、J Blank, H Blank, Open Blank を連続して取得し filter wheel の漏れを調べる必要がある。

Thermal 成分は、H filter の漏れが以外と少ない事が判明したが、やはり 1.7, 1.9 μm cutoff filter の漏れは大きい。Thermal count の計算には以下の事を仮定している。

filter	波長帯	効率	
H Open	1.49 - 1.81 μm	0.2	入射 F F/8
H 1.7	1.49 - 1.73 μm	0.2	
1.9 1.7	1.33 - 1.73 μm	0.2	
J Open	1.05 - 1.35 μm	0.11	
J 1.7	1.05 - 1.35 μm	0.11	

今回、Bad pixel として登録されたものの個数は 1523 個 (図2) で、全体の 2.3 % に相当する。この数は、前回登録した数よりやや減少しているが、判定基準の変化により生じた差であると考えられる。

2) standard flat image の作成。

Flat frame は、懐中電灯でカメラ入射窓を間接照明して撮った Light flat と、Dome flat light を用い望遠鏡と OHS を通して撮った Dome flat、天体の写っていない空を用いた Sky flat の3種類を、観測に用いた全ての filter を用いて取得した。

Light flat (図3)

懐中電灯による間接照明でカメラ入射窓を照らして撮る Light flat は、カメラ光学系の光透過特性と、detector の量子効率、入射光の光度ムラが含まれており、カメラ部に於ける感度補正に用いることができる。detector 全面を照らすことができる反面、OHS 自体の透過特性が反映されないため、場合によっては OHS により透過効率の差を Sky flat を用いて補正する必要がある。また、filter による違いを調べるため、J-band filter で撮った frame を H-band filter で撮った frame で割ったところ (図4)、dust の散乱による ring (dust ring) が数多く見られた。dust は短波長の光ほど強く光を散乱し、長波長の光は dust の影響を受けにくい事がわかる。大きい ring はカメラ直前の平面鏡上の dust による散乱 (focus が合っていないため、このような大きい ring として写る) 小さい粒状の部分はカメラ入射窓上の dust による散乱 (ほぼ focus が合っている) によるものであると考えられる。また、全体に広がっている pattern は、波長による量子効率の差を示している。flat を撮る場合は mirror 上の dust を少しでも減らす事が望ましいが、dust による flat の凹凸は 2%程度で、位置は日によって変化する事を考えると、この程度の状態で十分であるものと思われる。

Dome flat (図5) と Sky flat (図9)

図5は Dome flat を light flat で割り pixel 間の感度補正をし、bad pixel 部分を周囲の値を用いて平均化したものである。Dome flat は、焦点面での明るさはほぼ均一であると考えられるが、各点に集まる beam 中での flux は Dome light が大きい明るさのムラを持っているために均一ではない。図9は Open slit で撮った Sky で、これも Dome flat と同様、感度ムラと bad pixel の補正をしたものである。OHS は F/30 の入射光を最終的に F/10 で集光して赤外線カメラに導くため、F変換に伴うカメラ部分でのケラレが発生し、中央付近に明るい部分ができる。この明るい部分の位置は、Dome flat と Sky

flat、観測日の違いによってカメラに入射する状態が変化するため若干異なり、この場合も Dome flat を用いて Sky を平坦にすることはできない。Sky flat を用いて、dark lane 部分の感度差をどの程度補正できるか調べるため、Dome flat の中央部分7列をその両側の7列ずつを用いて補正し、一次元化したところ±1%程度までのレベルで平坦化することができ、必要に応じて Sky frame の dark lane 両側を用いて dark lane 内の感度補正が可能であるものと推測される。

3) system 全体の効率検査。(standard star)

今回観測した全ての faint standard star を用いて得られた system 全体の効率を図6に示す。この結果には天候による影響と、OHS による感度ムラが (Sky flat で補正をしていない) 含まれている。21日の H-band の data には効率が 5.5% 前後に達しているものがあるが、この部分の data は他のものと露出時間が異なる (通常は 30 sec であるのに対し、3 sec しか積分していない) ことが影響している可能性がある。積分時間が 30 sec の data のみで判断すると、system 全体の効率は H-band で最大 5.3%、J-band で最大 2.5% であり、OHS 内部での透過特性により、場所により 0.8 倍程度に効率が低下する。また、今回の観測では H-band で 14.87 mag という非常に暗い standard star (FS10) も一部用いているが、やや count が足りなかったため、今後はこのような暗い星は flux 標準としては用いない方が良い。結像精度は表などにはしていないが、seeing の良い日は 2.7 pixel 程度、seeing の悪い日は 3.5 pixel 程度で、1 pixel=0.385 arcsec、seeing ~ 0.6-1.0 arcsec であると考え、光学系による像の広がり は 1 pixel 弱であると予想され、良好であった。

4) 光軸の調整。(bright star)

光軸の調整は前回と同様、bright star の out focus image を用いて行なったが、今回は、OHS の grating に取り付けられている Lyot stop の mask に斜めに十字をつけ、OHS の光軸の中心がわかるようにした。図7に調整が完全に行なわれた状態での bright star の out focus 像を示す。この像には、主鏡・OHS の Lyot stop・NICMOS camera の cold stop の3つの image が重なって見えており、これらの中心が完全に一致して初めて十分な効率が得られる。図8に各像に関係した holder のネジと像の移動方向の関係を示す。

5) 夜光除去率の検査。(sky)

図9は open slit での sky の H-band image である。図10はこの image を一次元化し、500 um・300 um の各 slit を dark lane 上にあてた場合の count 数を示している。この測定の結果、H-band における夜光除去率は 500 um slit を用いた場合 1/18、300 um slit を用いた場合 1/21であった。夜光除去率は前回の試験観測時とほぼ同様で、

	Count ADU/60sec/pix	H mag	Flux photons/s/m ² /um	除去率
除去されていない部分	580	13.9	26300	—
dark lane 上	100	15.8	4540	5.8
500 um slit	32	17.0	1450	18
300 um slit	28	17.1	1270	21

現在の OH mask での限界に達しているようにも判断される。図11は分光観測の結果で、実線は dark lane 上に slit をあてて観測したもの、点線は slit 位置をずらして夜光がほとんど除去されない部分で観測をしたものである。H-band には、まだ少し夜光が残っている部分が数カ所存在し、J-band には完全には除去されていない O₂ の line (1.269 um, 1.280 um) などが残っている。(O₂ の line を除去する mask は極めて幅が広く、slit を少し動かした程度では O₂ line の除去率は大きく変化しないため、この部分の形はあまり変化していない) この結果を推定するため、過去に我々が行なった UH88 クーデ分光器での観測 data を Coxon(1980), Coxon and Foster(1982), Oliva and Origlia(1992), Steed and Baker(1979), Hubbard and Brault らの data と比較して再検討し、現在の夜光 mask の基礎となっている Steed and Baker の data を修正して現在の mask の性能

simulation (図12) を行なった。結果は、今回の漏れの pattern を良く再現しており、
 回目の mask はこの修正 data を元に製作することにした。

6) mask pattern

SAO star の分光結果をその星の温度の black body で割ったものが mask pattern で、
 OHS の波長による感度特性を表す曲線である (図13)。J-band の感度は H-band の約
 半分であることがわかる。今回の mask は mask が集中している部分が少ないので、凹凸
 が前回のものに比べて小さいが、観測後半で追加した O₂ line の mask の部分 (1.27 μm
 とそれに対応する H-band の 1.69 μm) は大きく切れ込んでいる。

7) MG 0414+0534

重力レンズ天体 MG 0414+0534 については H-band 撮像と分光観測を行なった。(J-band
 撮像観測は object をとらえることができず、data が得られなかった) 観測した frame
 数は以下のとおり。

H band 撮像 240 sec x 10 : H = 14.4 (3" φ) (図14・15)
 分光 240 sec x 5 : (図16)

図14は全ての撮像 data を10倍に引き延ばし、最も明るい成分の中心を合わせて
 shift and add をした後、重ね合わせたもの、図15はそれを更に deconvolve した結果
 である。(対数表示で contour は 0.25 mag おき) 3つの成分の明るさの比は、図15
 より求めたものである。図16は分光の観測結果で、縦軸は mJy である。左側のグラフ
 は Hewitt et al. (1992) による R-band での分光観測結果で、今回の観測結果はその延
 長線上にあることがわかる。重力源による吸収は H-band 前半までで終わっているよう
 にも見える。北の成分に対する南東・南西の成分の相対的位置は過去の結果と一致した。

	R. A.	DEC.	波長帯
SE	+0".68	-1".84	H
	+0".60	-1".9	R
	+0" 66	-1" 72	5 GHz
SW	-1" 31	-1".67	H
	-1".34	-1".7	R
	-1" 34	-1".64	5 GHz

R-band, Radio の data は
 Hewitt et al. (1992) より。
 誤差は R,H-band では 0".1
 Radio(VLA) では 0".01 程度。

また、最も明るい南東成分に対する残りの2つの成分の明るさの比は波長によって異なり、

波長帯	N	SW
H	1.51 mag	2.22 mag
R	1.02 mag	1.20 mag
5 GHz	1.77 mag	2.88 mag

R-band, Radio の data は Hewitt et
 al. (1992) より。R-band の data には
 ±0.2 mag 程度の variability が見ら
 れるため、それらを平均した値を用い
 ている。

短い波長ほど明るい成分と暗い成分との光度比が小さくなっている傾向が見られる。これは、①重力レンズ効果による各成分の光の到達時間の差(数日~数百日)と object の光度変化によりたまたま発生した ② object の部分的な増光率の違いにより、電波や赤外が強く出ている部分が特に増光されている ③重力レンズ源によって短い波長ほど最も明るい南東成分が強く減光されている、等の原因が考えられる。

8) High-z starburst galaxy

この object は emission line が完全には確認されていない非常に赤い銀河で、R-band

での absorption line で $z \sim 2.3$ 程度であると考えられている。今回の観測では J,H-band の撮像 mode での観測と、分光観測を行なった。解析に用いた data は以下の通り。

J band 撮像	240 sec x 9	: J = 18.7 (3" ϕ) (図17)
H band 撮像	240 sec x 4	: H = 17.7 (3" ϕ) (図18)
分光	240 sec x 6	: (図19)

H-band 測光 data はこの他にも 8 frame あるが、dark lane をやや外しているため用いていない。測光は mosaic operation で 6 回、合計 36 frame の観測をしたが、object をとらえていたのは、最終日に行なった 1 回 (6 frame) だけであった。 $z = 2.3$ の場合、balmer jump は J-band 前半で観測されるが、今回の観測では確認できなかった。また、図 19 で 1.7 μm 付近に emission line があるようにも見えるが、これが [O III] 5007 であるとする、object の redshift は $z \sim 2.4$ となる。

とにかく、この object は位置を確認できたにもかかわらず、slit 内に入れることが非常に困難であった。最終日に XY guider を用いて微調整し slit 中央に捕らえることができたが、mosaic operation の 6 回の露出の内、後半の何回かは状態が良くなかったようである (直後に湿度が 100 % に達し、観測を打ち切らざるを得なかった)。しかし、今回の観測により、H-band で 18 mag の天体を分光することは十分可能であることが裏付けられた。

9) Mosaic Operation の精度と課題

今回行なった Mosaic Operation は一方向 5 回移動で、1 回あたりの移動量は、3.2 arcsec (South) (Object の移動方向、すなわち望遠鏡の移動方向は North) であった。当初、一回の移動量は 5 arcsec に設定されたが、翌日に少な目に変更されたようである。図 20 は撮像 mode で行なった 4 回の Mosaic Operation での天体の移動を、同一の傾きを持つ直線で fitting し、その残差を plot したものである。4 回の Mosaic の内、2 回は明るい星が複数写っていたため、その内の 2 つの星について移動量を調べたため、図 20 には 6 個の星についての測定の結果が示してある。同一の frame に写っている星 (同一の記号で plot してある) の位置の差は、中心位置の決定誤差であると考えられ、約 ± 0.1 pixel であるが、data の散らばりはそれよりも有意に大きく、最大 ± 0.5 pixel 程度ある事が確認された。また、4 回の Mosaic での、平均的な移動量と方向の再現性は ± 0.1 pixel 以下で、1 回の Mosaic Operation での移動回数が 5 回であることを考えると、この精度は 1 回あたりの移動の安定性よりも良いものと考えられる。ただし、1 回の Mosaic での移動回数が 10 回近くになった場合、安定性よりも再現精度が下回ってしまう可能性はある。また、今回の観測では、Mosaic 終了と同時に位置修正を必ず行っており、Mosaic を終了して原点に戻ったときの位置の再現性は調べることができなかった。次回の観測では、Mosaic を連続で行なうときの原点の再現性について調べる必要がある。

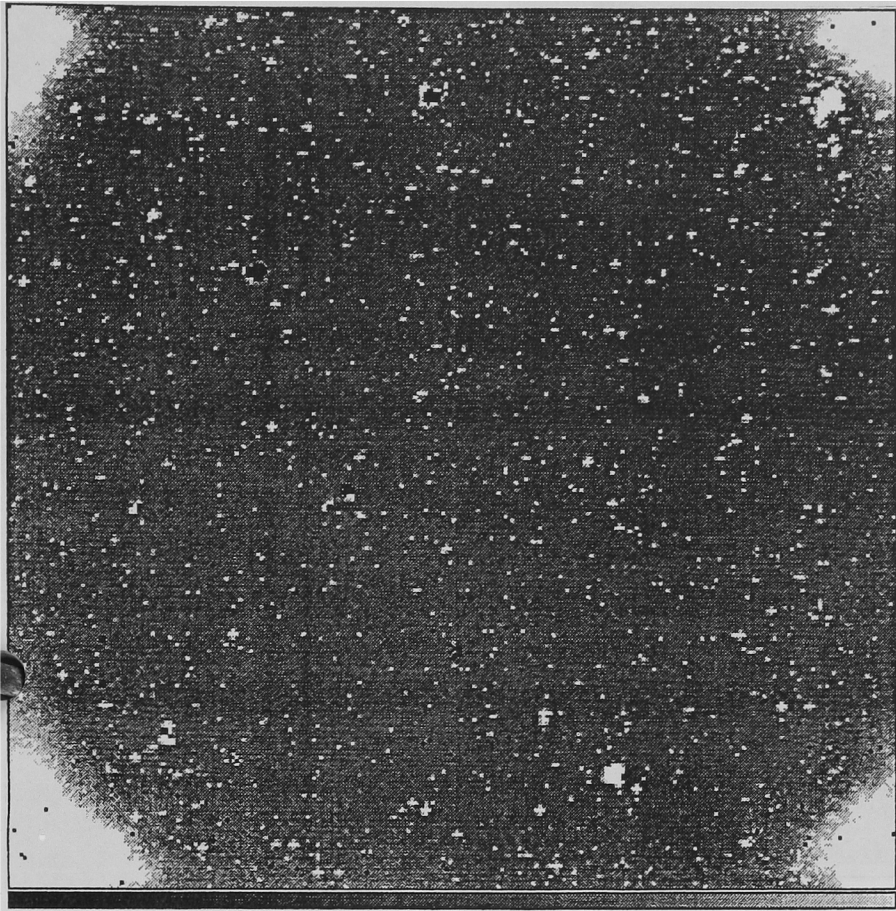


図1 thermal frame

周辺部の白い部分は読み出し回路による発光で、multi-sampling による16回の読み出しのため、非常に明るく光っている事がわかる。

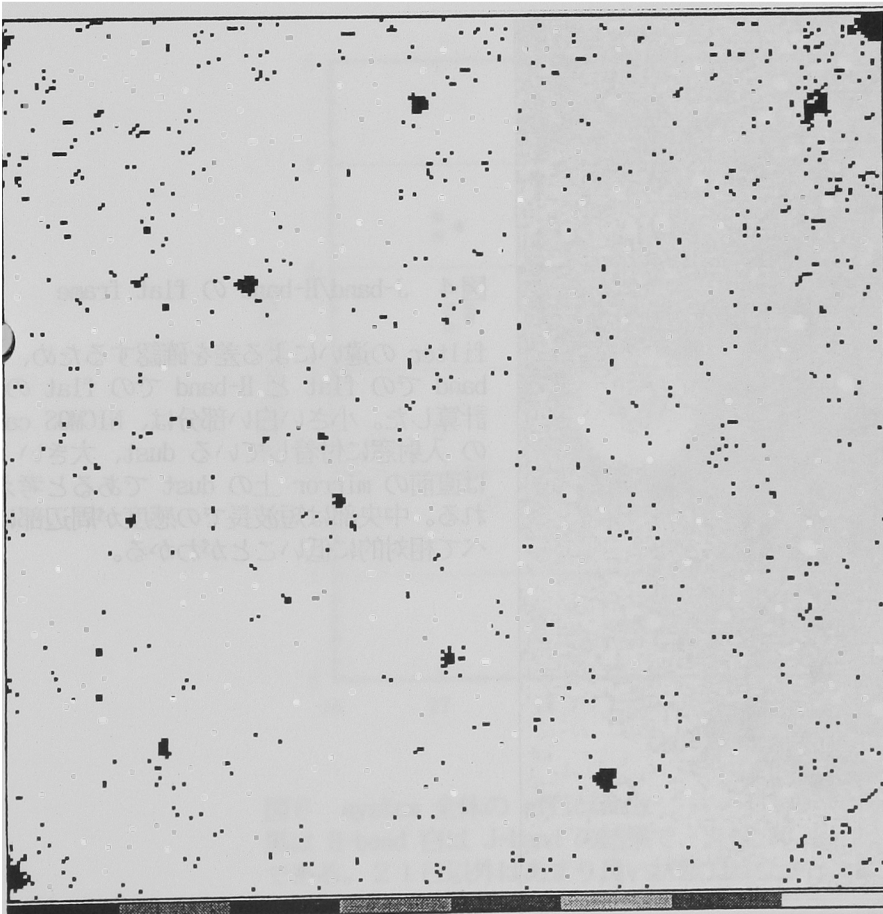


図2 bad pixel frame

図の黒い部分が bad pixel で、全体の2.32% (1523個) を占めている。前回の観測より判断の条件を弱くしたため、数は前回に比べ減少した。



図3 light flat frame

懐中電灯による pixel 間の量子効率を補正するための flat で、大きい scale での平坦性はあまり保証されていない。

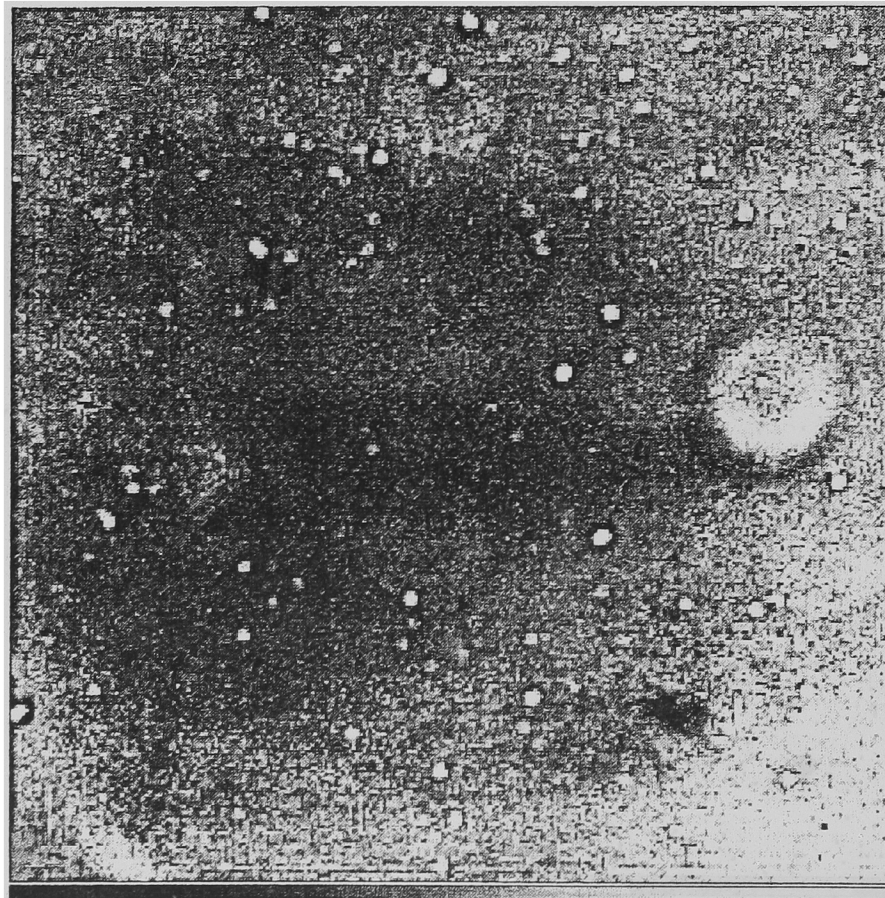


図4 J-band/H-band の flat frame

filter の違いによる差を確認するため、J-band での flat と H-band での flat の比を計算した。小さい白い部分は、NICMOS camera の入射窓に付着している dust、大きい ring は直前の mirror 上の dust であると考えられる。中央部は短波長での感度が周辺部に比べて相対的に低いことがわかる。

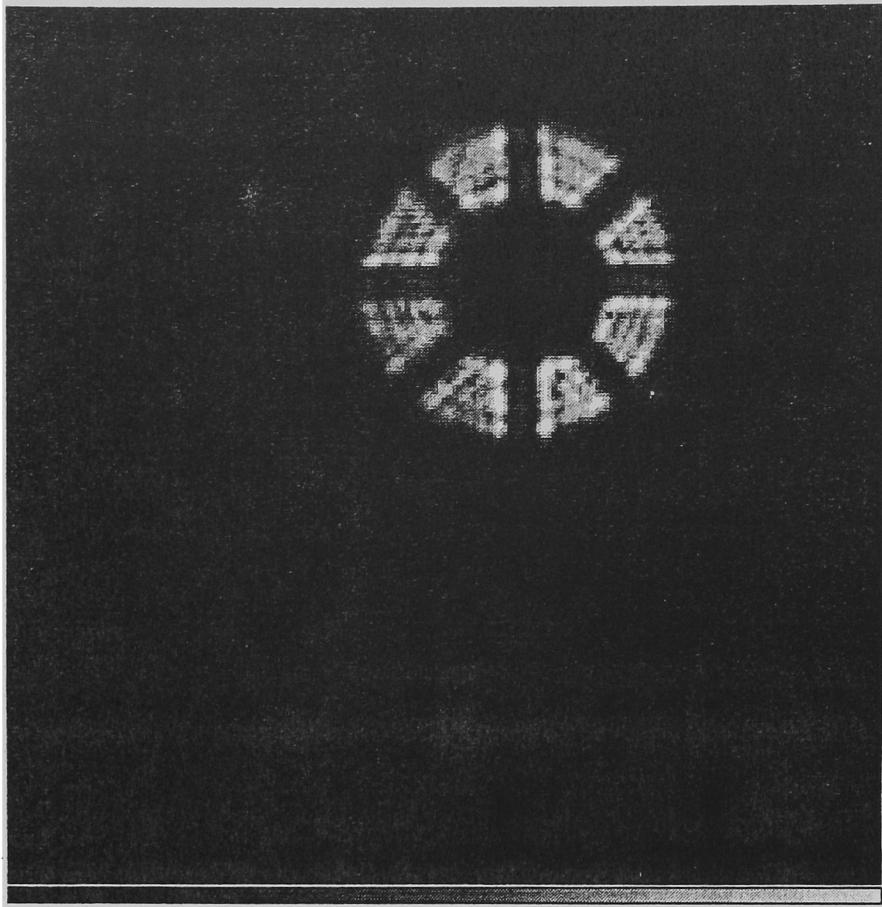


図7 焦点面外での星像

OHS の Lyot stop に斜めに十字をつけ、中心がはっきりとわかるようにした。(もちろん観測の際には外している) 主鏡の中心の穴、OHS の Lyot stop、NICMOS camera の cold stop がよく一致していることがわかるが、この作業は中央部付近で行なうことが望ましい。

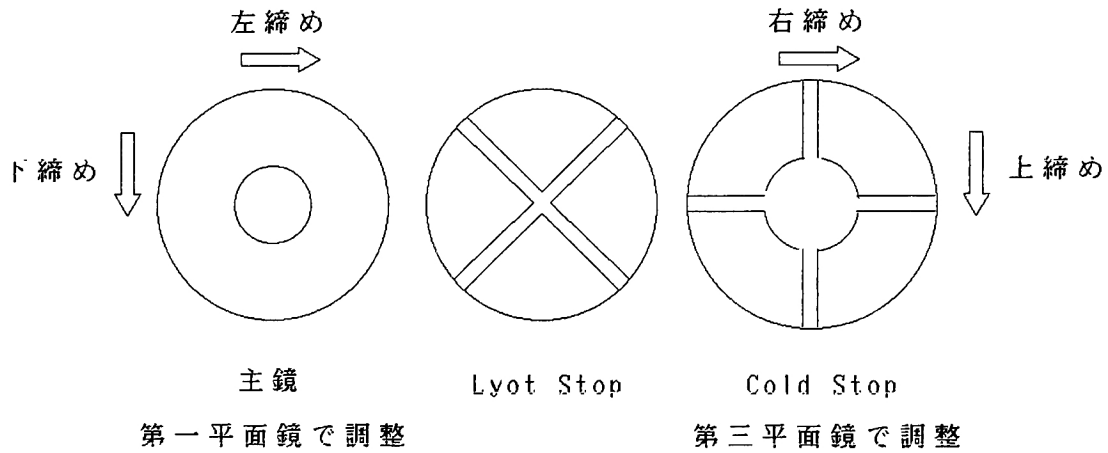


図8 光軸調整の方法

out focus image は上の3つの pattern の重ね合わせでつくられている。まず、主鏡の central hole と NICMOS camera の cold stop を一致させ、その後交互に移動させて OHS の Lyot stop に一致させる。

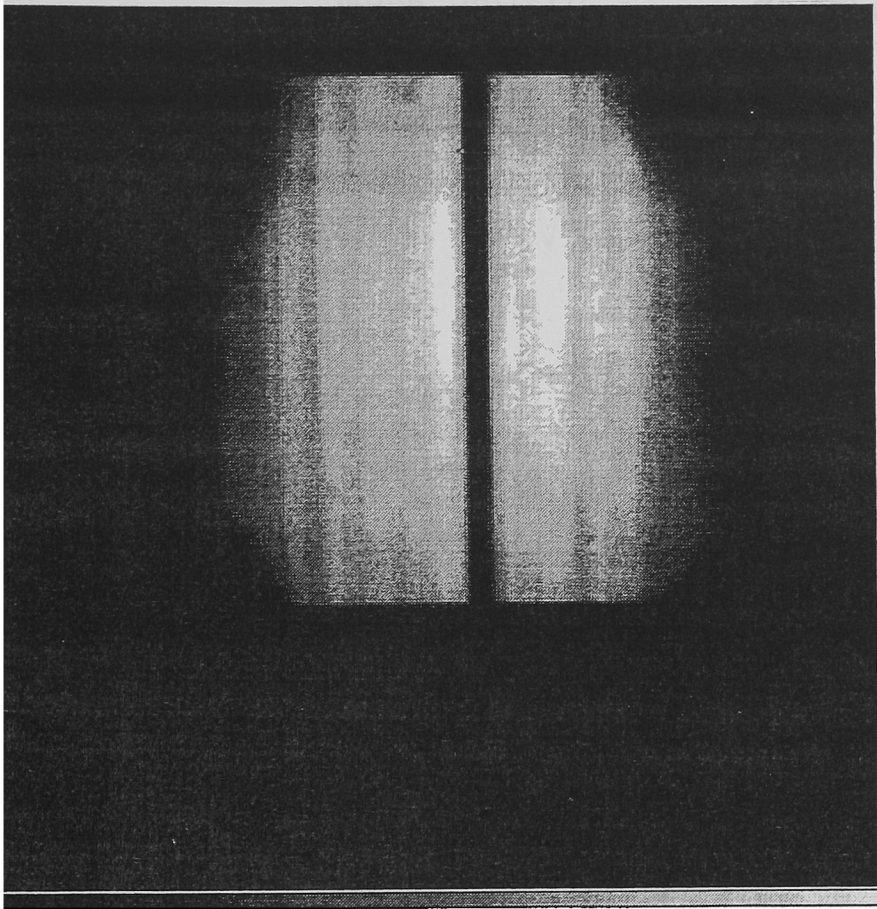


図9 sky flat frame

sky flat は dark lane が中央に存在するためこのままでは用いることはできないが、dark lane の両側の部分を用いて、中央部の一次元感度補正をする事はできる。

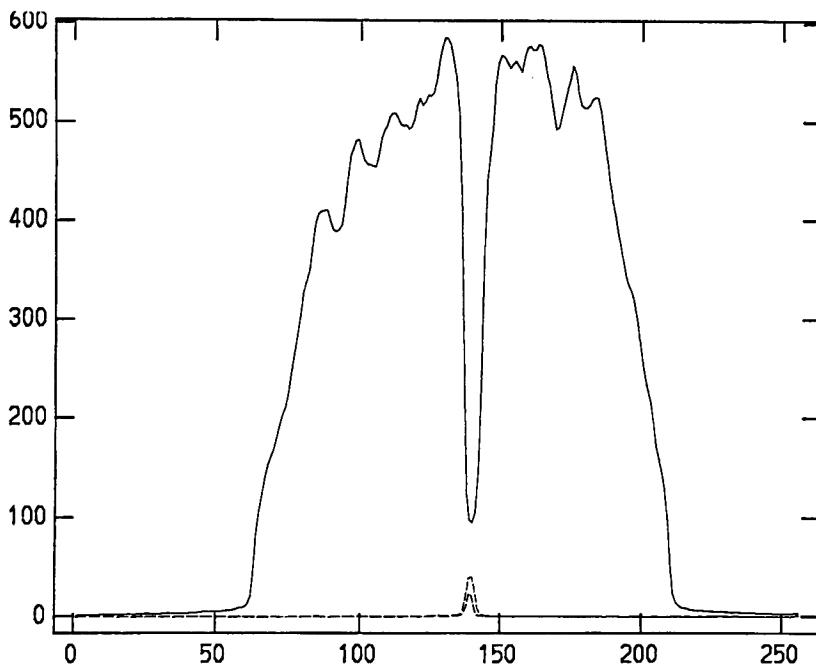


図10 夜光除去率

実線は図8を一次元化したもの、破線は dark lane 上に $500 \mu\text{m}$ ($1''.5$) \cdot $300 \mu\text{m}$ ($0''.9$) slit をあてたときの sky の明るさを示している。 $500 \mu\text{m}$ slit を用いたときの夜光除去率は $1/18$ 、 $300 \mu\text{m}$ slit を用いたときの夜光除去率は $1/21$ で前回とほぼ同じ値であった。

OH airglow emission

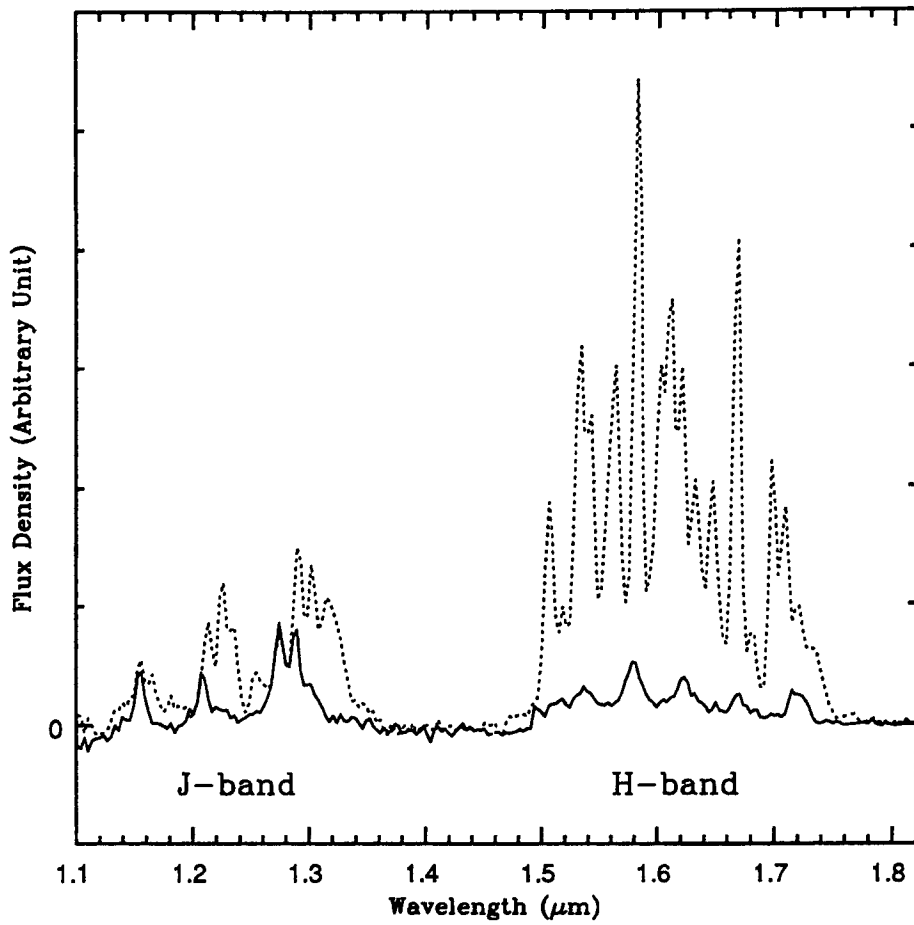


図11 sky 分光

実線は dark lane 上に slit をあてて分光したもの、破線は dark lane の隣の明るい部分に slit をあてて分光したものである。O₂ line (1.269, 1.280, 1.580 μm) などがあまり良く除去されていないことがわかる。

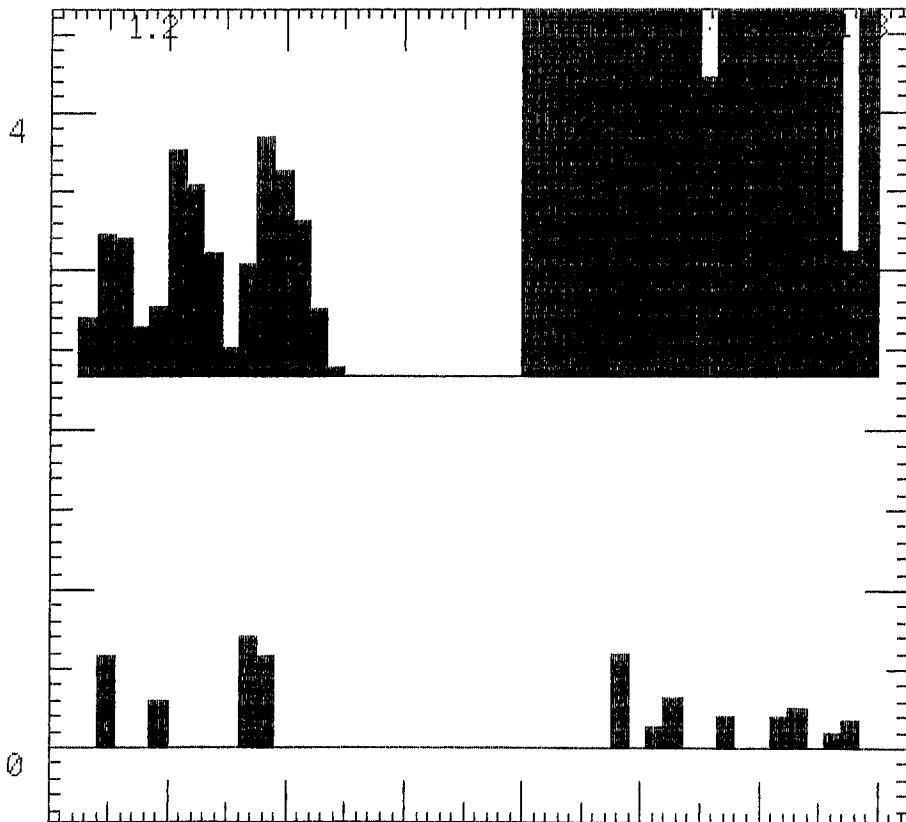


図12 mask 評価 simulation

我々が過去に UH88 coude 分光器を用いて観測した data と、他のグループの観測結果等から現在の夜光 line list を修正し、mask の評価 simulation を行なった。結果は、観測結果と良く一致している。

Mask pattern

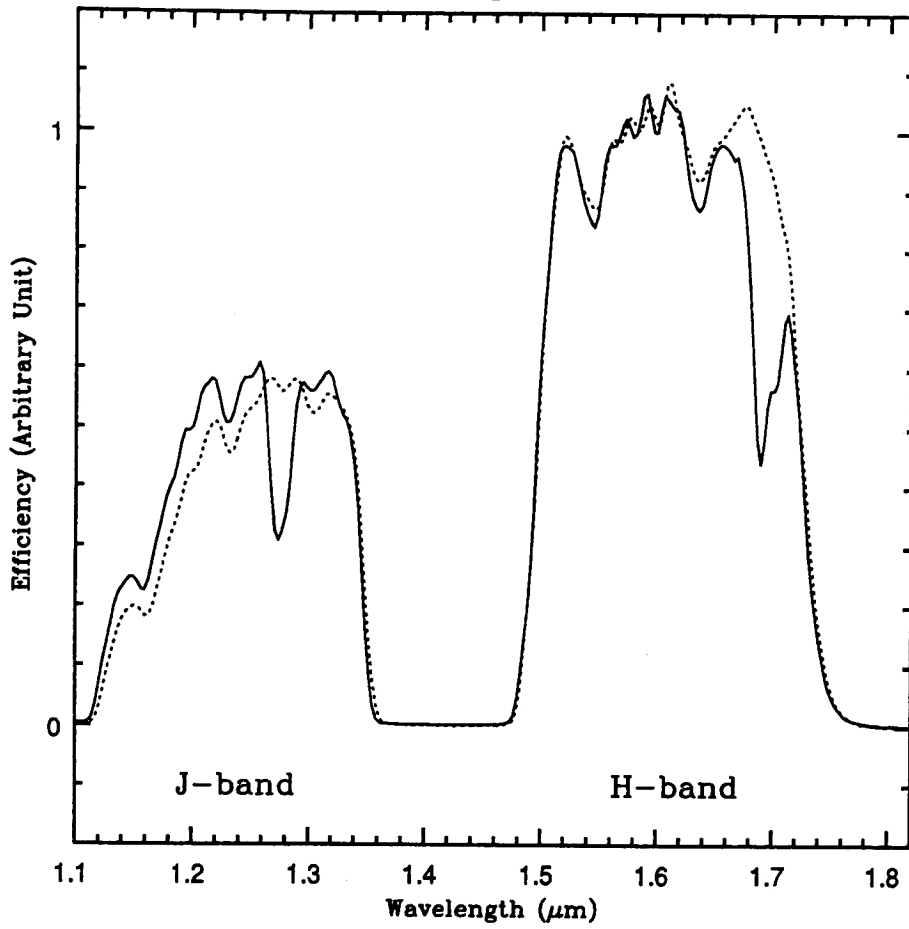


図13 mask pattern

OHS の波長による感度特性を表す曲線。夜光 mask の大まかな密度ムラを反映して凹凸がついている。観測後半では mask を追加したため mask pattern の形状が変化した。

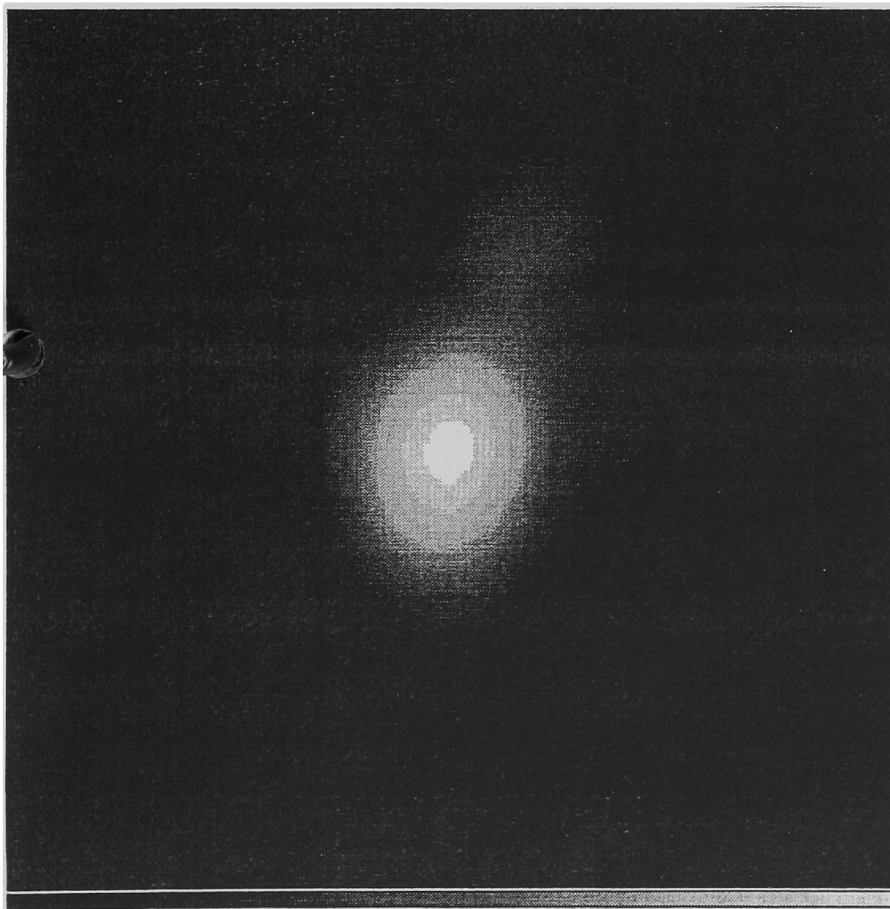


図14 MG 0414+0534 (H-band)

積分時間 240 sec の frame を10枚重ね合わせて shift and add し、10倍に拡大した 7".7 x 7".7 image。対数表示にしてある。

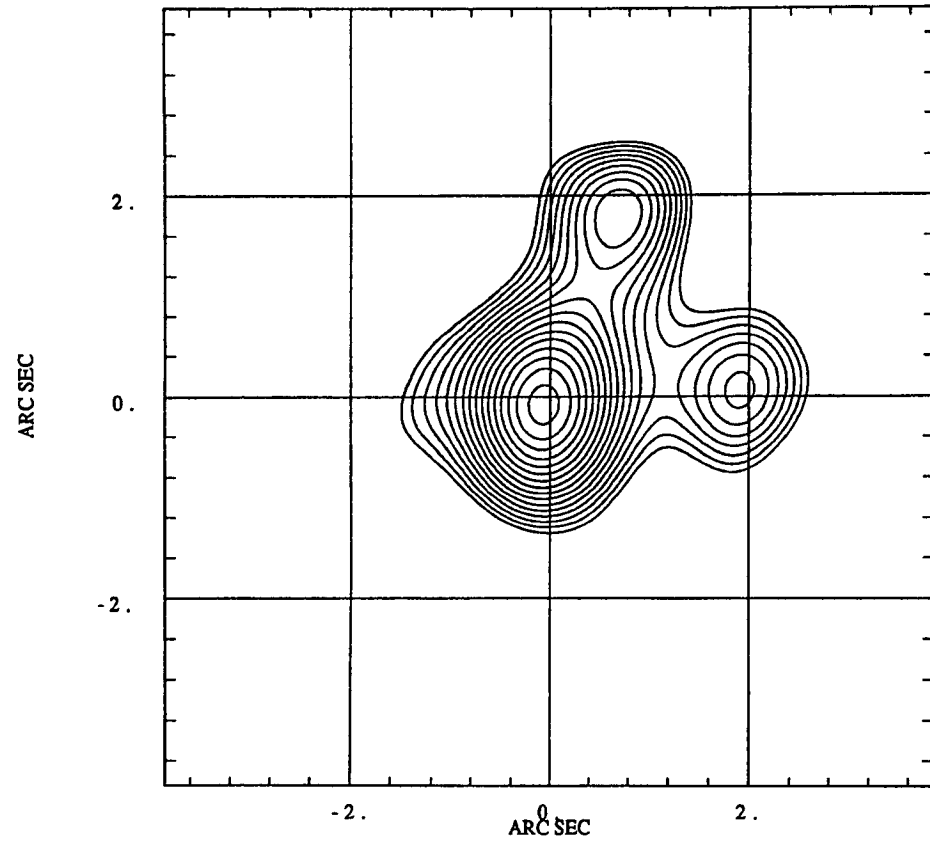


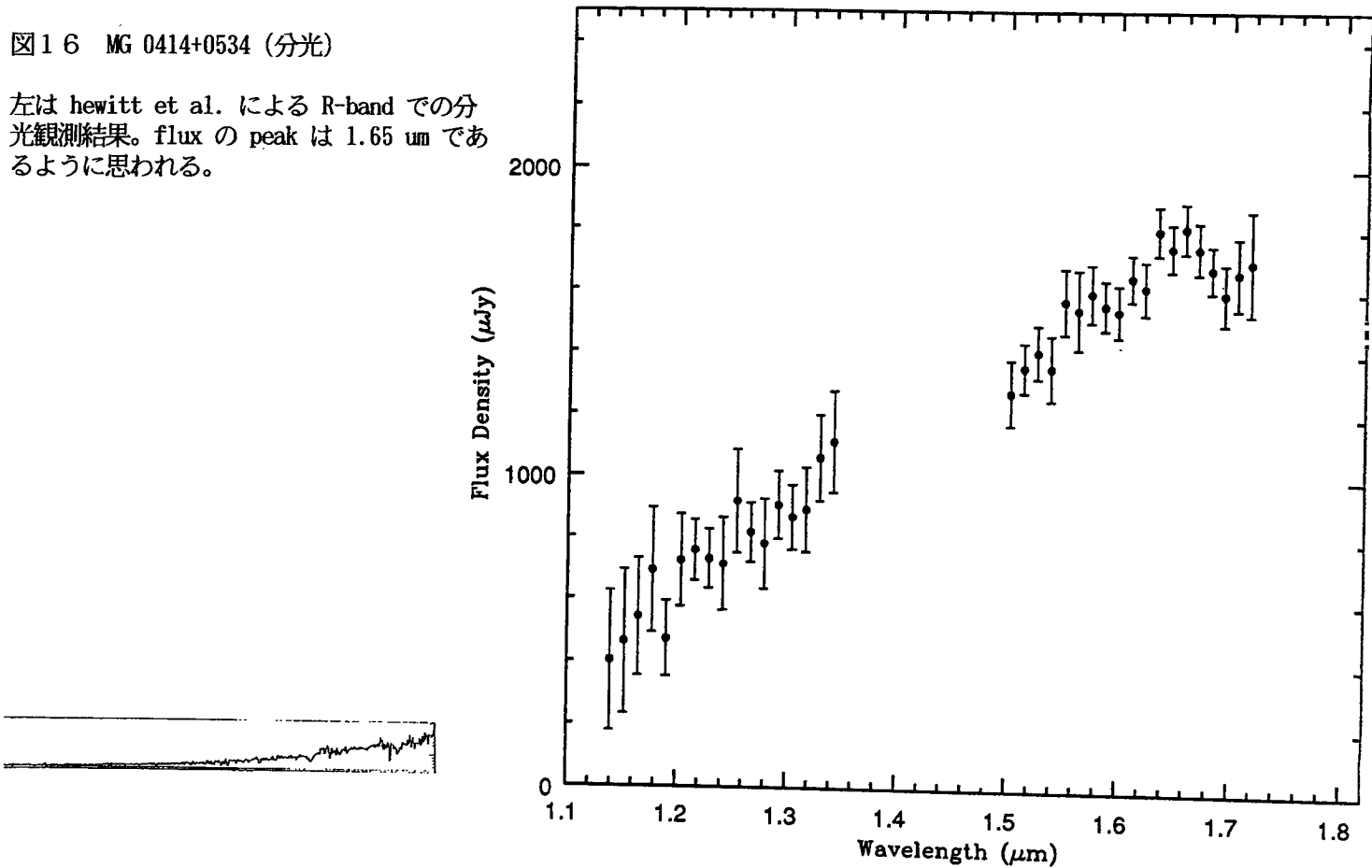
図15 MG 0414+0534 (H-band)

図13を人工的な point spread function を用いて deconvolve したもの。(当日の他の data は失われてしまった) 重量レンズにより分かれている3つの成分が良く確認できる。contour は 0.25 mag おきに引いてある。

図16 MG 0414+0534 (分光)

左は hewitt et al. による R-band での分光観測結果。flux の peak は 1.65 μm であるように思われる。

MG 0414+0534



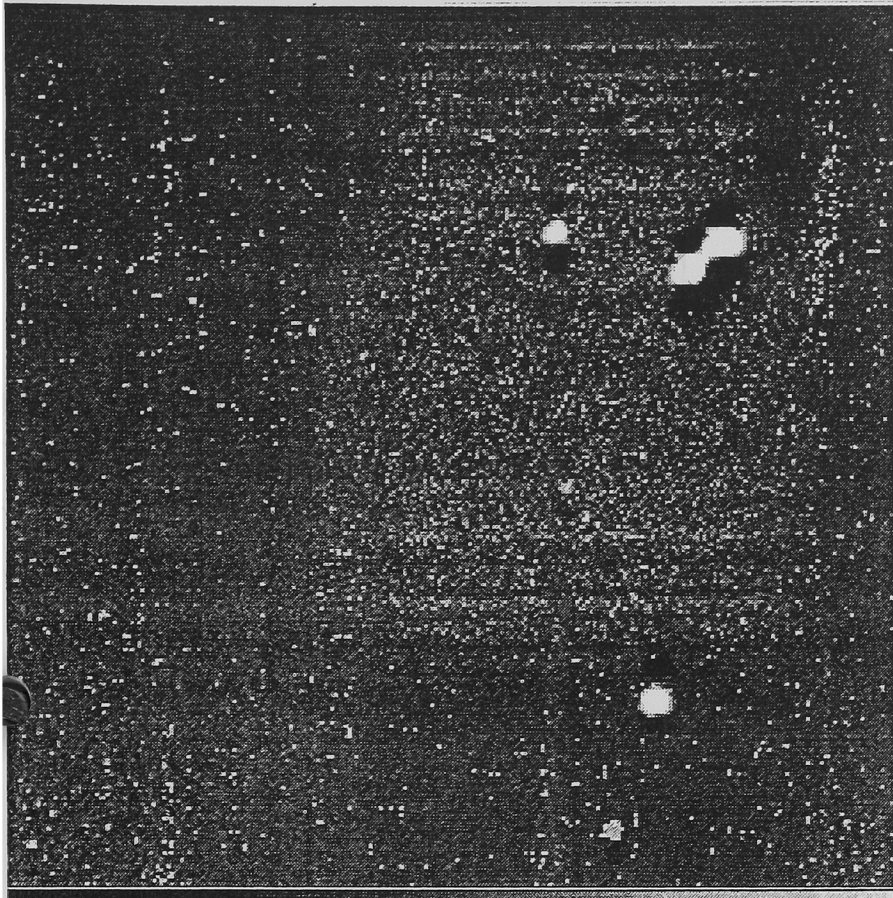


図17 High-z starburst galaxy (J-band)

撮像 mode の 9 frame を slit 方向の感度補正をし、sky の時間変化による凹凸を補正した後、周囲の星を用いて shift and add したもの。中央右付近に薄く写っているものが object。時間的に後になっている frame を優先的に sky として用いたため、負の image は南側の方が強く出ている。object は dark lane の右端にあり、あまり良い状態ではない。

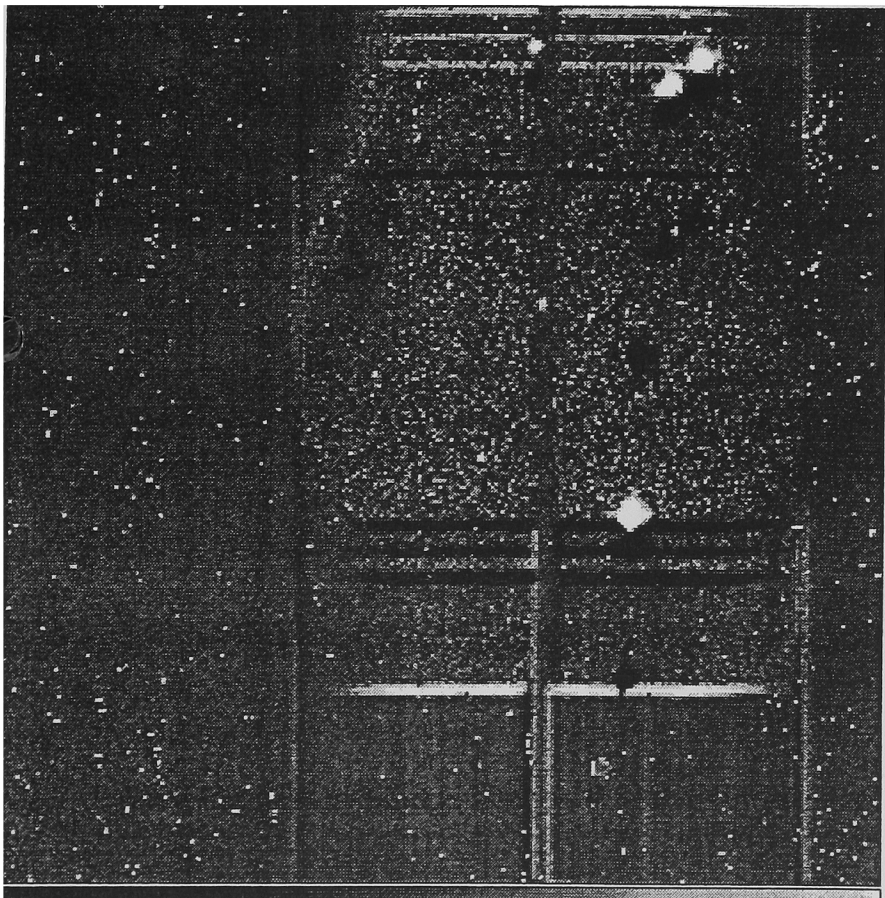


図18 High-z starburst galaxy (H-band)

図16と同様の処理をしたものであるが、4 frame しか用いていない。しかし、object は dark lane 中央に捕らえられており、状態は非常に良い。

High-z starburst galaxy

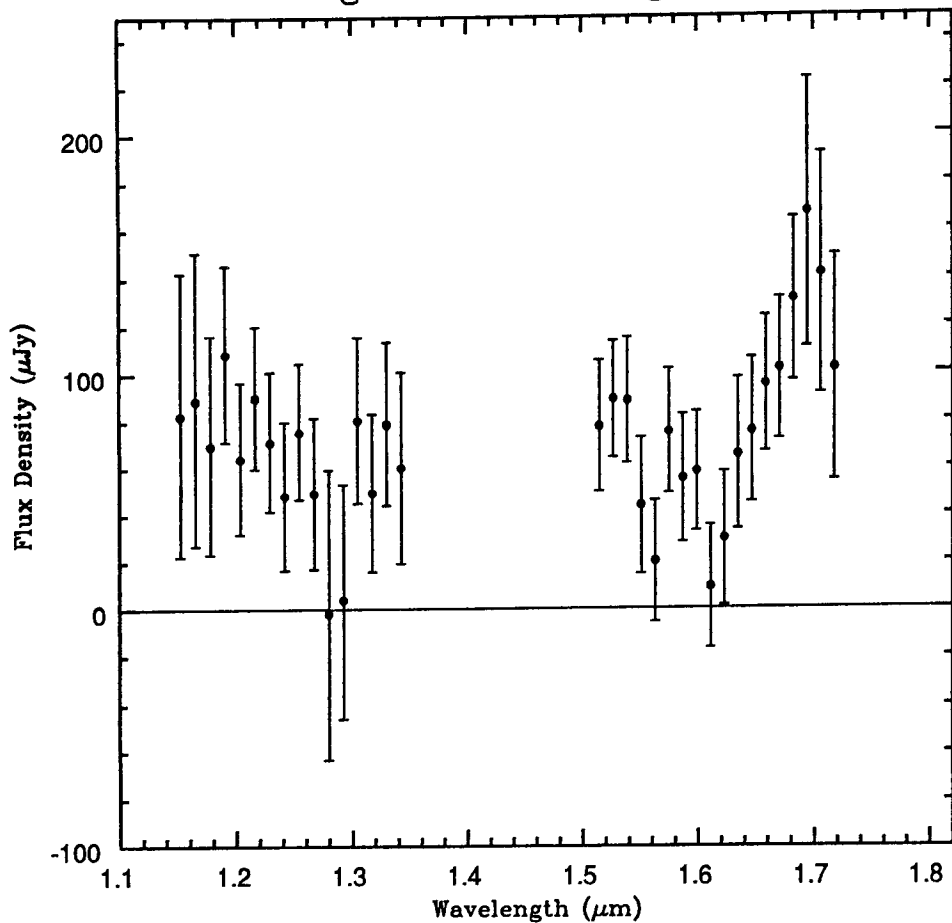


図19 High-z starburst galaxy (分光)

240 sec 1回の露出では辛うじてわかる程度なので、mosaicの1 stepを8.305 pixとしてshiftし、6 frameを重ねたもの。最終日以外の観測 dataはobjectを捕らえていなかったのが残念である。1.7 μm付近に emission lineがあるかどうかは微妙なところである。

Accuracy of the Mosaic Operation

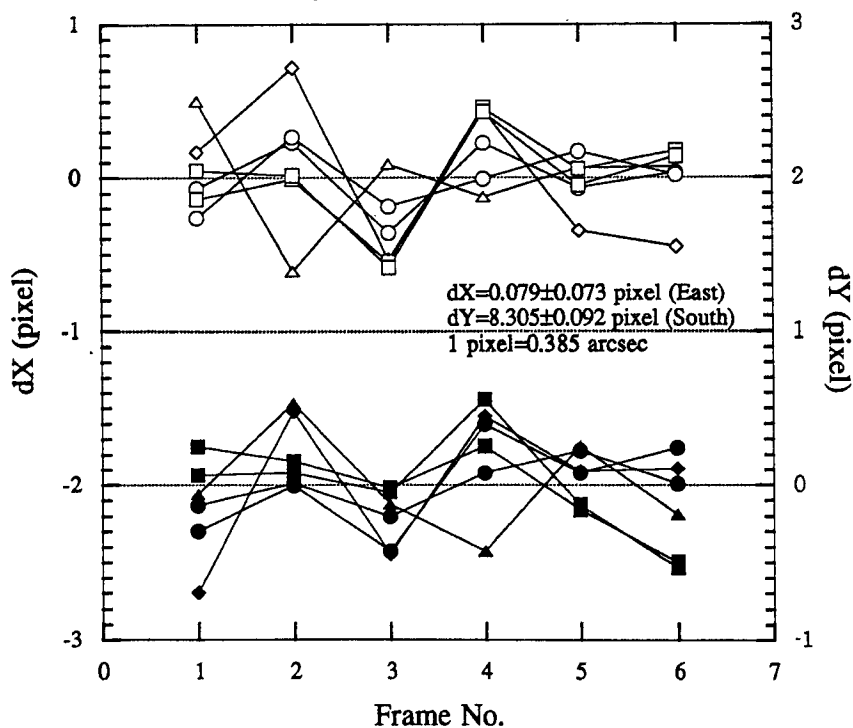


図20 mosaic operationの精度

4回の撮像 modeでの mosaic operationで観測された6つの星の位置の変化を、最小二乗法による直線で近似し、偏差をplotしたもの。白はX方向、黒はY方向の dataで、同じ印は同一 frameに写っている星を表している。mosaic operationの安定性は±0.5 pixel以下で、objectの中心決定精度によるばらつきと同程度か、それ以下であると考えられる。

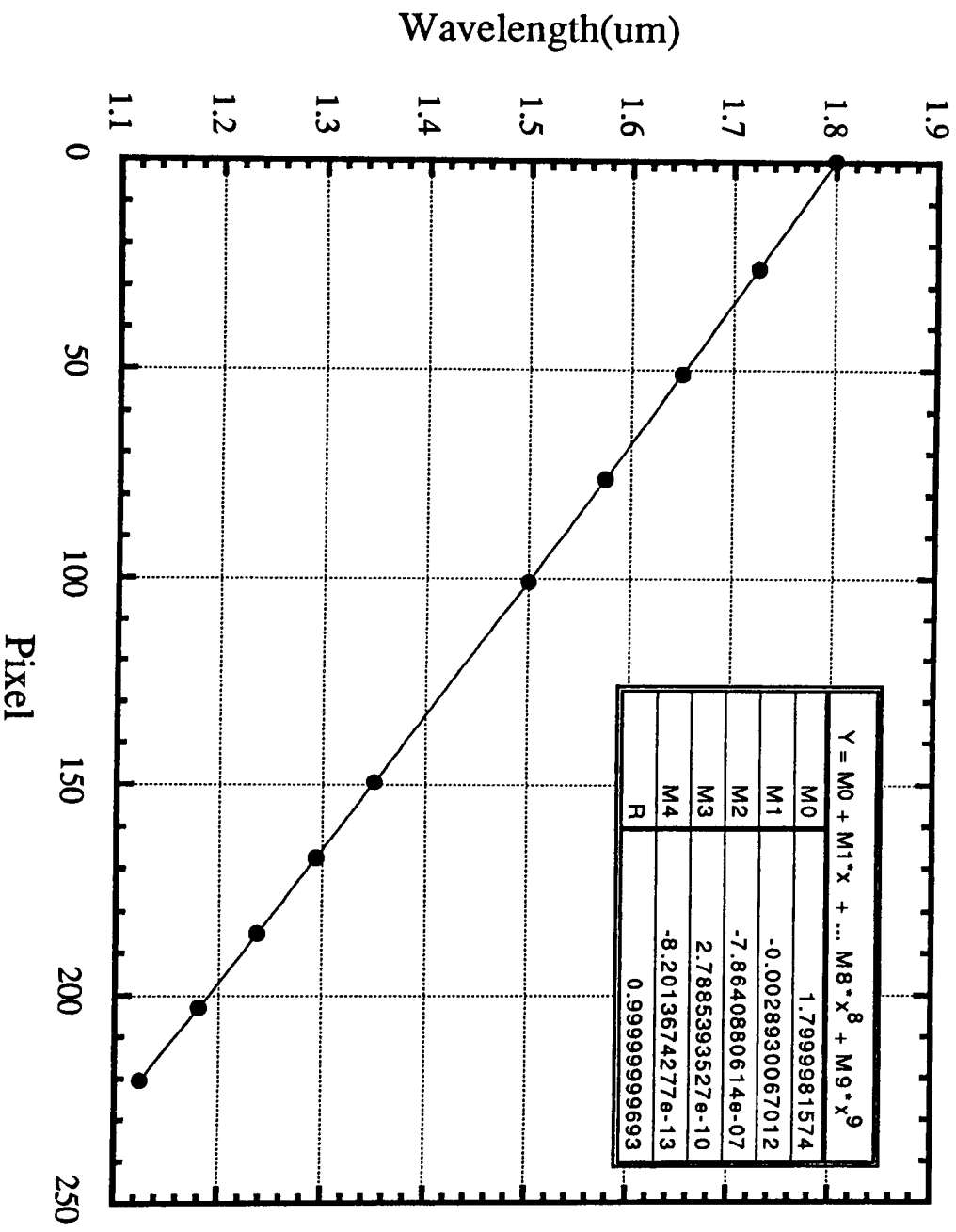
付図1 pixel - 波長間の関係 (raytrace による理論曲線)

付表1 bias, dark, thermal data 表

付表2 分光観測の解析手順

付表3 flux 換算表

Pixel - Wavelength



-20.00	1.88607	74.00	1.61168	130.00	1.44182	224.00	1.14589
-19.00	1.88323	75.00	1.60869	131.00	1.43875	225.00	1.14267
-18.00	1.88038	76.00	1.60570	132.00	1.43567	226.00	1.13944
-17.00	1.87753	77.00	1.60270	133.00	1.43259	227.00	1.13622
-16.00	1.87468	78.00	1.59971	134.00	1.42951	228.00	1.13299
-15.00	1.87183	79.00	1.59671	135.00	1.42643	229.00	1.12976
-14.00	1.86897	80.00	1.59371	136.00	1.42335	230.00	1.12652
-13.00	1.86612	81.00	1.59071	137.00	1.42026	231.00	1.12329
-12.00	1.86326	82.00	1.58771	138.00	1.41717	232.00	1.12005
-11.00	1.86040	83.00	1.58470	139.00	1.41409	233.00	1.11681
-10.00	1.85754	84.00	1.58170	140.00	1.41100	234.00	1.11358
-9.00	1.85468	85.00	1.57869	141.00	1.40790	235.00	1.11033
-8.00	1.85182	86.00	1.57568	142.00	1.40481	236.00	1.10709
-7.00	1.84895	87.00	1.57267	143.00	1.40172	237.00	1.10385
-6.00	1.84608	88.00	1.56966	144.00	1.39862	238.00	1.10060
-5.00	1.84322	89.00	1.56665	145.00	1.39552	239.00	1.09735
-4.00	1.84035	90.00	1.56363	146.00	1.39242	240.00	1.09410
-3.00	1.83747	91.00	1.56062	147.00	1.38932	241.00	1.09085
-2.00	1.83460	92.00	1.55760	148.00	1.38622	242.00	1.08760
-1.00	1.83173	93.00	1.55458	149.00	1.38312	243.00	1.08434
0.00	1.82885	94.00	1.55156	150.00	1.38001	244.00	1.08109
1.00	1.82597	95.00	1.54854	151.00	1.37691	245.00	1.07783
2.00	1.82309	96.00	1.54552	152.00	1.37380	246.00	1.07457
3.00	1.82021	97.00	1.54249	153.00	1.37069	247.00	1.07131
4.00	1.81733	98.00	1.53946	154.00	1.36758	248.00	1.06805
5.00	1.81444	99.00	1.53644	155.00	1.36447	249.00	1.06478
6.00	1.81156	100.00	1.53341	156.00	1.36135	250.00	1.06151
7.00	1.80867	101.00	1.53038	157.00	1.35824	251.00	1.05824
8.00	1.80578	102.00	1.52734	158.00	1.35512	252.00	1.05497
9.00	1.80289	103.00	1.52431	159.00	1.35200	253.00	1.05170
10.00	1.80000	104.00	1.52127	160.00	1.34888	254.00	1.04843
11.00	1.79710	105.00	1.51824	161.00	1.34576	255.00	1.04515
12.00	1.79421	106.00	1.51520	162.00	1.34263	256.00	1.04188
13.00	1.79131	107.00	1.51216	163.00	1.33951	257.00	1.03860
14.00	1.78841	108.00	1.50912	164.00	1.33638	258.00	1.03532
15.00	1.78551	109.00	1.50607	165.00	1.33325	259.00	1.03203
16.00	1.78261	110.00	1.50303	166.00	1.33012	260.00	1.02875
17.00	1.77971	111.00	1.49998	167.00	1.32699	261.00	1.02546
18.00	1.77680	112.00	1.49694	168.00	1.32386	262.00	1.02218
19.00	1.77390	113.00	1.49389	169.00	1.32073	263.00	1.01889
20.00	1.77099	114.00	1.49084	170.00	1.31759	264.00	1.01559
21.00	1.76808	115.00	1.48779	171.00	1.31445	265.00	1.01230
22.00	1.76517	116.00	1.48473	172.00	1.31131	266.00	1.00901
23.00	1.76226	117.00	1.48168	173.00	1.30817	267.00	1.00571
24.00	1.75934	118.00	1.47862	174.00	1.30503	268.00	1.00241
25.00	1.75643	119.00	1.47556	175.00	1.30189	269.00	0.99911
26.00	1.75351	120.00	1.47250	176.00	1.29874	270.00	0.99581
27.00	1.75059	121.00	1.46944	177.00	1.29559	271.00	0.99250
28.00	1.74767	122.00	1.46638	178.00	1.29245	272.00	0.98920
29.00	1.74475	123.00	1.46332	179.00	1.28930	273.00	0.98589
30.00	1.74183	124.00	1.46025	180.00	1.28614	274.00	0.98258
31.00	1.73890	125.00	1.45718	181.00	1.28299	275.00	0.97927
32.00	1.73597	126.00	1.45411	182.00	1.27984	276.00	0.97596
33.00	1.73305	127.00	1.45104	183.00	1.27668	277.00	0.97264
34.00	1.73012	128.00	1.44797	184.00	1.27352	278.00	0.96933
35.00	1.72719	129.00	1.44490	185.00	1.27036	279.00	0.96601
36.00	1.72425	130.00	1.44182	186.00	1.26720	280.00	0.96269
37.00	1.72132			187.00	1.26404		
38.00	1.71838			188.00	1.26088		
39.00	1.71545			189.00	1.25771		
40.00	1.71251			190.00	1.25454		
41.00	1.70957			191.00	1.25137		
42.00	1.70662			192.00	1.24820		
43.00	1.70368			193.00	1.24503		
44.00	1.70074			194.00	1.24186		
45.00	1.69779			195.00	1.23868		
46.00	1.69484			196.00	1.23551		
47.00	1.69189			197.00	1.23233		
48.00	1.68894			198.00	1.22915		
49.00	1.68599			199.00	1.22596		
50.00	1.68304			200.00	1.22278		
51.00	1.68008			201.00	1.21960		
52.00	1.67712			202.00	1.21641		
53.00	1.67416			203.00	1.21322		
54.00	1.67120			204.00	1.21003		
55.00	1.66824			205.00	1.20684		
56.00	1.66528			206.00	1.20365		
57.00	1.66231			207.00	1.20045		
58.00	1.65935			208.00	1.19726		
59.00	1.65638			209.00	1.19406		
60.00	1.65341			210.00	1.19086		
61.00	1.65044			211.00	1.18766		
62.00	1.64747			212.00	1.18446		
63.00	1.64449			213.00	1.18125		
64.00	1.64152			214.00	1.17804		
65.00	1.63854			215.00	1.17484		
66.00	1.63556			216.00	1.17163		
67.00	1.63258			217.00	1.16842		
68.00	1.62960			218.00	1.16520		
69.00	1.62662			219.00	1.16199		
70.00	1.62364			220.00	1.15877		
71.00	1.62065			221.00	1.15556		
72.00	1.61766			222.00	1.15234		
73.00	1.61467			223.00	1.14912		

Class.	No.	Filter	Int. (sec)	ADU	Comment
B	4005	1.9 BLK	1 F6	28	Liquid N ₂
B	4006	1.9 BLK	1 F6	22	Liquid N ₂
B	4007	1.9 BLK	1 F6	2	
B	4028	H 1.7	1 F6	1	Liquid N ₂
B	5034	1.9 BLK	0.2 F9 (16)	10	
B	5035	1.9 BLK	0.2 F9 (16)	10	
B	6000	H BLK	1 F9 (16)	9	
B	6021	J BLK	0.1 F9 (16)	9	
B	6022	J BLK	0.1 F9 (16)	9	
B	6023	J BLK	0.1 F9 (16)	9	
B	6024	J BLK	0.1 F9 (16)	9	
B	7007	J BLK	0.2 F9 (8)	6	
B	7009	J BLK	0.2 F9 (8)	6	
B	7010	J BLK	0.2 F9 (8)	9	?
B	7011	J BLK	0.2 F9 (8)	6	
B	7012	J BLK	0.2 F9 (8)	4	Liquid N ₂
B	7013	J BLK	0.2 F9 (8)	5	Liquid N ₂
B	7015	J BLK	0.2 F9 (8)	5	
B	7027	J OPN	0.2 F9 (8)	6	
B	7030	J OPN	0.2 F9 (8)	6	
B	7031	J OPN	2 F9 (8)	6	
B	7032	J OPN	2 F9 (8)	6	
B	7166	J BLK	0.5 F9 (8)	5	Liquid N ₂
B	9000	OPN BLK	1 F9 (8)	6	Liquid N ₂
B	9001	OPN BLK	0.2 F9 (8)	6	Liquid N ₂
B	9142	J OPN	0.2 F9 (8)	6	
B	9143	J OPN	0.2 F9 (8)	6	
B	9144	J OPN	0.2 F9 (8)	6	
BD	4008	1.9 BLK	100 F6	9	
BD	4196	H BLK	240 F9 (16)	19	Liquid N ₂
BD	5033	1.9 BLK	240 F9 (16)	22	Ar lamp
BD	5036	1.9 BLK	240 F9 (16)	22	
BD	5037	1.9 BLK	240 F9 (16)	21	
BD	5105	H BLK	240 F9 (16)	20	
BD	5106	H BLK	240 F9 (16)	20	
BD	5107	H BLK	240 F9 (16)	20	
BD	5108	H BLK	240 F9 (16)	20	
BD	5109	H BLK	240 F9 (16)	20	
BD	5110	H BLK	240 F9 (16)	20	
BD	6001	H BLK	240 F9 (16)	12	Re-boot
BD	6002	H BLK	240 F9 (16)	14	Re-boot
BD	6003	H BLK	240 F9 (16)	16	Re-boot
BD	6004	H BLK	240 F9 (16)	16	Re-boot
BD	6020	J BLK	240 F9 (16)	18	
BD	6025	J BLK	600 F9 (16)	31	
BD	7000	J BLK	250 F6	12	OPN OPN
BD	7001	J BLK	250 F9 (1)	11	OPN OPN
BD	7002	J BLK	240 F9 (8)	11	OPN OPN
BD	7003	J BLK	240 F9 (8)	11	
BD	7004	J BLK	240 F9 (8)	11	
BD	7005	J BLK	480 F9 (8)	19	
BD	7006	J BLK	240 F9 (8)	11	
BD	7008	J BLK	240 F9 (8)	13	
BD	7014	J BLK	240 F9 (8)	3	Liquid N ₂
BD	7016	J BLK	240 F9 (8)	8	Liquid N ₂

Class.	No.	Filter	Int. (sec)	ADU	Comment
BD	7076	J BLK	240 F9 (8)	16	
BD	7164	J BLK	240 F9 (8)	29	?
BD	7165	J BLK	240 F9 (8)	-20	Liquid N ₂
BD	7167	H BLK	240 F9 (8)	2	Liquid N ₂
BD	8219	J BLK	240 F9 (8)	14	
BD	9002	OPN BLK	240 F9 (8)	28	Liquid N ₂
BD	9003	OPN BLK	240 F9 (8)	21	Liquid N ₂
BD	9004	OPN BLK	240 F9 (8)	19	Liquid N ₂

Bias

F6 1~2 ADU
F9 (16) 9 ADU
F9 (8) 6 ADU

Dark

H BLK 10 ADU/240sec
J BLK 5~8 ADU/240sec

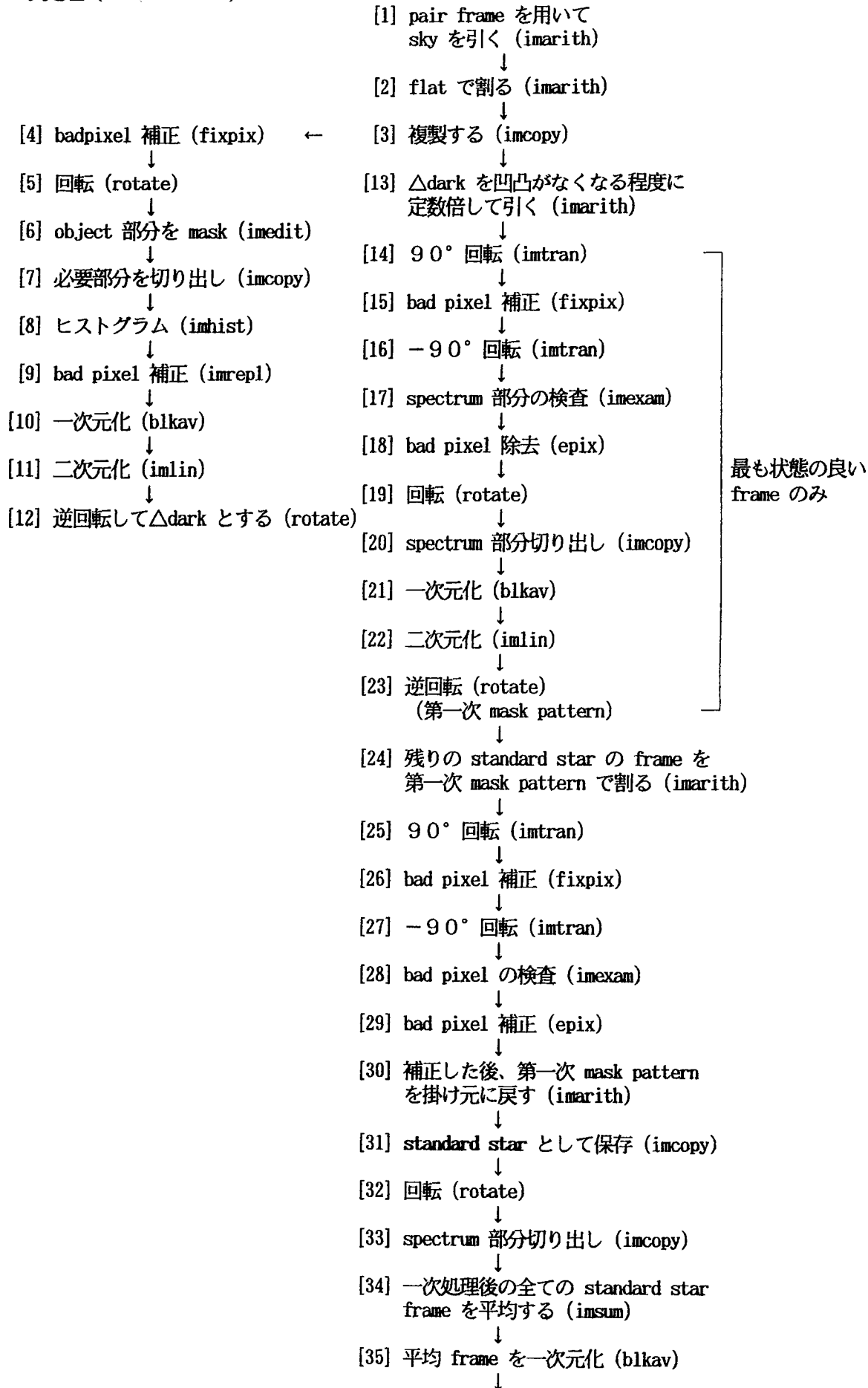
Thermal

H OPN 40~50ADU/240sec
H 1.7 12~18ADU/240sec
J OPN 4~5 ADU/240sec
J 1.7 5 ADU/240sec
1.9 1.7 15~22ADU/240sec

Class.	No.	Filter	Int. (sec)	ADU	Comment
BDT	4009	H OPN	100 F6	480	OPN OPN
BDT	4104	H OPN	240 F6	49	
BDT	4184	H OPN	30 F6	9	
BDT	4189	H OPN	120 F6	26	
BDT	4192	H OPN	240 F6	66	?
BDT	4193	H OPN	240 F9 (16)	66	?
BDT	5039	H OPN	60 F9 (16)	27	
BDT	8211	H OPN	120 F9 (8)	21	?
BDT	8212	H OPN	120 F9 (8)	36	
BDT	8213	H OPN	120 F9 (8)	36	
BDT	8214	H OPN	120 F9 (8)	36	
BDT	8215	H OPN	120 F9 (8)	36	
BDT	8216	H OPN	240 F9 (8)	64	
BDT	9046	H OPN	60 F9 (8)	22	
BDT	9135	H OPN	240 F9 (8)	64	
BDT	9136	H OPN	240 F9 (8)	63	
BDT	4010	H 1.7	100 F6	490	OPN OPN
BDT	4011	H 1.7	100 F6	50	OPN OPN
BDT	4012	H 1.7	100 F6	200	Light ON
BDT	4013	H 1.7	100 F6	7	
BDT	4029	H 1.7	30 F6	6	Liquid N ₂
BDT	4030	H 1.7	240 F6	16	Liquid N ₂
BDT	4195	H 1.7	240 F6	30	
BDT	4197	H 1.7	240 F9 (16)	32	Liquid N ₂
BDT	4198	H 1.7	240 F9 (16)	40	Light ON
BDT	6016	H 1.7	240 F9 (16)	31	
BDT	6017	H 1.7	240 F9 (16)	31	
BDT	6099	H 1.7	240 F9 (16)	76	Flat
BDT	7028	J OPN	240 F9 (8)	18	
BDT	7029	J OPN	240 F9 (8)	17	
BDT	7033	J OPN	240 F9 (8)	17	
BDT	7034	J OPN	240 F9 (8)	16	
BDT	7072	J OPN	240 F9 (8)	18	
BDT	7073	J OPN	240 F9 (8)	18	
BDT	7074	J OPN	240 F9 (8)	18	
BDT	7075	J OPN	240 F9 (8)	18	
BDT	8218	J OPN	240 F9 (8)	18	
BDT	8220	J OPN	240 F9 (8)	-3	Liquid N ₂
BDT	9137	J OPN	120 F9 (8)	12	
BDT	9138	J OPN	120 F9 (8)	12	
BDT	9139	J OPN	120 F9 (8)	12	
BDT	9140	J OPN	120 F9 (8)	11	
BDT	9141	J OPN	120 F9 (8)	12	
BDT	6018	J 1.7	240 F9 (16)	18	
BDT	6019	J 1.7	240 F9 (16)	19	
BDT	4150	1.9 1.7	240 F9 (16)	36	
BDT	4194	1.9 1.7	240 F9 (16)	48	?
BDT	4199	1.9 1.7	240 F9 (16)	39	
BDT	6005	1.9 1.7	240 F9 (16)	87	OPN OPN, MC
BDT	6006	1.9 1.7	240 F9 (16)	42	OPN OPN, MC
BDT	6007	1.9 1.7	240 F9 (16)	34	OPN OPN, MC
BDT	6008	1.9 1.7	240 F9 (16)	30	OPN OPN, MC

Class.	No.	Filter	Int. (sec)	ADU	Comment
BDT	6009	1.9 1.7	240 F9 (16)	28	OPN OPN, MC
BDT	6010	1.9 1.7	240 F9 (16)	42	
BDT	6011	1.9 1.7	240 F9 (16)	41	BC
BDT	6012	1.9 1.7	240 F9 (16)	40	BC
BDT	6013	1.9 1.7	240 F9 (16)	39	
BDT	6014	1.9 1.7	240 F9 (16)	39	
BDT	6015	1.9 1.7	240 F9 (16)	23	MC
BDT	6026	1.9 1.7	240 F9 (16)	35	
BDT	6027	1.9 1.7	240 F9 (16)	21	MC
BDT	6057	1.9 1.7	240 F9 (16)	40	
BDT	6058	1.9 1.7	240 F9 (16)	40	
BDT	6081	1.9 1.7	240 F9 (16)	42	
BDT	7068	1.9 1.7	240 F9 (8)	23	
BDT	7069	1.9 1.7	240 F9 (8)	23	
BDT	7070	1.9 1.7	240 F9 (8)	26	
BDT	7071	1.9 1.7	240 F9 (8)	29	
BDT	7077	1.9 1.7	240 F9 (8)	30	
BDT	8217	1.9 1.7	240 F9 (8)	34	
BDT	9053	1.9 1.7	120 F9 (8)	21	
BDT	9108	1.9 1.7	240 F9 (8)	35	
BDT	9109	1.9 1.7	240 F9 (8)	34	
BDT	9135	1.9 1.7	240 F9 (8)	34	

解析手順
一次処理 (Standard star)

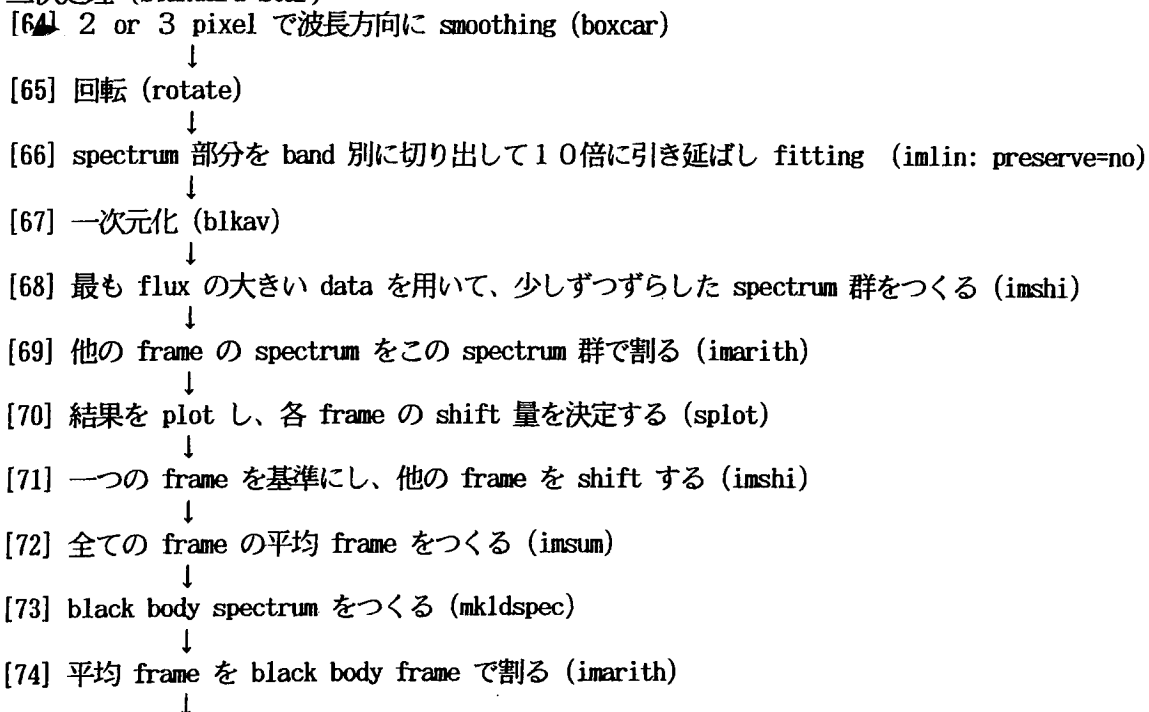


[36] 二次元化 (imlin)
 ↓
 [37] 逆回転 (rotate)
 (第二次 mask pattern)

一次処理 (Object)



二次処理 (standard star)



- [75] **mask pattern** として保存 (imcopy)
 ↓
 [76] 少しずつずらした **mask pattern** 群をつくる (imshi)

二次処理 (Object)

- [77] 2 or 3 pixel で波長方向に smoothing (boxcar)
 ↓
 [78] 回転 (rotate)
 ↓
 [79] spectrum 部分を band 別に切り出して10倍に引き延ばし fitting (imlin: preserve=no)
 ↓
 [80] 一次元化 (blkav)
 ↓
 [81] **mask pattern** 群で割る (imarith)
 ↓
 [82] 結果を plot し、shift 量を決定する (splot)
 ↓
 [83] object spectrum を **mask pattern** を基準にして shift する (imshi)
 ↓
 [84] **object spectrum** として保存 (imcopy)
 ↓
 [85] 各 object frame を shift した後、和 frame をつくる (imsum)
 ↓
 [86] 各 object frame の和 frame に対する平均 flux 比率 (重み) を調べる (splot)
 ↓
 [87] 和 frame に各 frame の重みを掛ける (imarith)
 ↓
 [88] 各 object frame と和×重み frame との偏差 frame をつくる (imarith)
 ↓
 [89] 2乗する (imfunc)
 ↓
 [90] 結果の和を分散 frame とする (imsum)

- [91] spectrum を smoothing した時と同じ size で smoothing (boxcar)
 ↓
 [92] smoothing の size で割る (imarith)
 ↓
 [93] 回転 (rotate)
 ↓
 [94] object+sky frame でも object frame と同様な方法で切り出して fitting (imlin: preserve=no)
 ↓
 [95] 23で割り、2倍する (imarith)
 ↓
 [96] 一次元化 (blkav)
 ↓
 [97] 各 frame の和を計算し background frame とする (imsum)
 ↓
 [98] background frame と分散 frame を足す (imarith)
 ↓
 [99] 平方根を計算 (imfunc)
 ↓
 [100] noise frame として保存 (imcopy)
 ↓
 [101] object spectrum の和 frame を **mask pattern** で割りobject/star frame をつくる (imarith)
 ↓
 [102] noise frame を **mask pattern** で割り、noise/star frame をつくる (imarith)
 ↓
 [103] object/star frame でのH-band flux を調べる (splot)
 ↓
 [104] H-band flux が測光値と一致するように normalize する (imarith)
 ↓
 [105] spectrum frame として保存 (imcopy)
 ↓
 [106] 同じ定数で noise/star frame も normalize する (imarith)
 ↓
 [107] error frame として保存 (imcopy)
 ↓
 [108] 波長方向に1/10に縮小 (blkav)
 ↓
 [109] 数値の list を出力 (listpix)

- 注意 ① [73]は一度J・H共通のものをつくり、そこから各 band に対応する部分を切り出して用いる。
 ② normalize する定数はJ・H共通の値を用いるべきなので、控えておく必要がある。
 ③ 波長割付が正しく行なわれるよう、J・Hで同一の frame を基準にして shift をする。

J mag	erg/s/cm2/um	photons/s/m2/um	uJy	ADU/sec
12	5.3886e-11	335696.7	27526.35	312.0879
13	2.1453e-11	133643.3	10958.44	124.2444
14	8.5404e-12	53204.3	4362.63	49.4626
15	3.4000e-12	21181.0	1736.80	19.6914
16	1.3536e-12	8432.3	691.43	7.8393
17	5.3886e-13	3357.0	275.26	3.1209
18	2.1453e-13	1336.4	109.58	1.2424
19	8.5404e-14	532.0	43.63	0.4946
20	3.4000e-14	211.8	17.37	0.1969
21	1.3536e-14	84.3	6.91	0.0784
22	5.3886e-15	33.6	2.75	0.0312

H mag	erg/s/cm2/um	photons/s/m2/um	uJy	ADU/sec
12	1.7434e-11	144810.3	15832.15	359.0031
13	6.9405e-12	57650.0	6302.89	142.9217
14	2.7631e-12	22950.9	2509.23	56.8982
15	1.1000e-12	9136.9	998.94	22.6516
16	4.3792e-13	3637.5	397.69	9.0178
17	1.7434e-13	1448.1	158.32	3.5900
18	6.9405e-14	576.5	63.03	1.4292
19	2.7631e-14	229.5	25.09	0.5690
20	1.1000e-14	91.4	9.99	0.2265
21	4.3792e-15	36.4	3.98	0.0902
22	1.7434e-15	14.5	1.58	0.0359

K mag	erg/s/cm2/um	photons/s/m2/um	uJy
12	6.3396e-12	70211.1	10234.92
13	2.5238e-12	27951.5	4074.60
14	1.0048e-12	11127.7	1622.13
15	4.0000e-13	4430.0	645.78
16	1.5924e-13	1763.6	257.09
17	6.3396e-14	702.1	102.35
18	2.5238e-14	279.5	40.75
19	1.0048e-14	111.3	16.22
20	4.0000e-15	44.3	6.46
21	1.5924e-15	17.6	2.57
22	6.3396e-16	7.0	1.02

temp.	Black Body (photons/s/m2/um)		
	J(1.05-1.35)	H(1.50-1.80)	K(2.00-2.20)
278	0.011762	97.437	16483
273	0.0057184	56.467	10561
268	0.0027072	32.076	6656.6
253	0.00024118	5.1530	1495.2
233	5.9510e-6	0.31393	151.78

A p p e n d i x F
第四回観測結果
(最新観測結果)

観測日時 : 1994年3月17日~22日
 観測場所 : ハワイ・マウナケア山
 観測装置 : UH88 (カセグレン焦点) + OHS + NICMOS3 camera

観測概要 : 今回の準備期間は前回と同じく5日間であったが、NICMOSを取り付けての調整は2日間で行なった。今回の予備調整では、ピンホールを用いての結像検査、Ar lamp scanによるマスク上での結像度検査の他、ファイバーバンドルを用いてOHSスリット部分に夜光を導き、マスク位置の調整を行なうこともできた。これで、取り付け後の温度変形・自重変形以外に対して、基本的な全ての調整を事前に行なうことが可能となった。観測1日目は相当な曇りで、新しいF/31 tip-tilt secondaryのcollimation testと、OHS本体の調整のみを行い、2~4日目が観測、5・6日目は雪のためドームを開けることができなかった。3日目は非常に天候は良かったが、望遠鏡主鏡保持機構のトラブルのため星像は2つに分裂し、完全な観測はできず、また、2・4日目は雲が多く測光観測をする事ができなかったが、全観測時間のほぼ半分を使ってIRAF F10214+4724の分光観測をし、他に、Quasar PC1643+4613A近くのRed Galaxyの測光観測と、Bulge globular cluster (X ray source) 探査と、Arp220・Mrk273の観測を行なった。今回の観測では、夜光マスクのサイズを0.8%小さくし、プリズム回転ステージ・NICMOSステージの補強を行った結果、分光時の結像性能が増し、更に分光時の露出単位は8分にすることができた。しかし、スリットステージの安定性には問題があった。

解析内容 : 今回の観解析内容は以下の通り
 1) bad pixel maskの登録とdark currentの検査。
 2) standard flat image
 3) 結像精度
 4) system全体の効率検査。(standard star)
 5) 残存夜光スペクトル
 6) mask pattern
 7) IRAS F10214+4724
 以下、順を追って解説する。

1) bad pixel maskの登録と Bias, Dark, Thermal 量の評価

今回の観測では、Bias, Dark, Thermal等のframe数が非常に少なく、かつ状態の悪いものが多いので、結果の信頼度は前回の観測結果に比べ劣るが、以下のような結果を得た(multiple samplingによる結果はsample回数で割った値を用いている)。

Bias	F6 F9 (8)	2 ADU 5 ADU	46 electron 115 electron	
Dark	H Blank	13 ADU/240sec	1.2 electron/sec	計算値 (273 K)
Thermal	H Open	32 ADU/240sec	3.1 electron/sec	3.5 electron/sec
	J Open	2 ADU/240sec	0.19 electron/sec	0.00 electron/sec
	1.7 Open	8 ADU/240sec	0.77 electron/sec	0.60 electron/sec

filter	波長帯	効率] 入射F F/8
H Open	1.49 - 1.81 um	0.2	
J Open	1.05 - 1.35 um	0.11	
1.7 Open	1.30 - 1.70 um	0.2	

Thermalは前回の観測に比べ全体的に低くなっているが、Darkは前回と比較して0.2 electron/sec増加している(この程度はdetectorの状態により十分変化し得る)。Darkは前回と同じくほぼ1

electron/sec であるとする、Thermal は全て 0.2 だけ増加することとなり、その場合、分光時の Thermal influx は前回のほぼ半分、Dark と同じ値となる。480 sec の積分時には、Read noise は 0.8 electron/sec に相当するので、現在は、Thermal, Dark, Read noise がほぼ一致したよい状態であると結論する事ができる。Fliter system の漏れは、Blank 時での成分は Dark に、Open 時での成分は Thermal に含まれている。今回は、よい状態での J Blank を取得していないので、最も漏れの少ない状態での Data が無く、Blank 時での漏れを推定することはできないが、前回の測定と総合すると、Blank 時での漏れは最大で 0.3 electron/sec、Open 時での漏れは最大で 0.4 electron/sec 程度であると考えられる。

また、今回の Badpixel の数は 1589 個 (2.4%) で、前回とほぼ同じ数であった。

2) standard flat image

観測3日目に、夕方の光でドーム内を明るくし Twilight flat (図1) を撮った。これを、同じ日に撮った sky (図2) と比較したところ、明るさの分布は大局的に見て一致しており、Dark lane に沿った南北方向の感度補正は十分に行なうことができる (誤差は3%程度) ことが判った (東西方向は確認していないが、補正できるものと思われる)。Twilight flat は観測システムの透過特性をよく表しているが、同じ日の観測に対してしか適用できない (明るさの中心が移動するため) ことと、Dome flat のように簡単に撮ることができない欠点がある。今回の観測では、Dome light が取り付けられていなかったため Dome flat を取得しておらず、Twilight flat と比較することはできなかったが、次回の観測ではこの2つを同じ日に撮って比較し、Dome flat がどの程度信頼できるのか確認する必要がある。

また、Twilight flat とドーム内を照らすドーム周辺の側壁に取り付けられたライトの分光 (図3・4) を行ない、SAO star と比較してみた (図5)。Twilight flat には大気中の O₂ の吸収によるものと思われる吸収が 1.28 μm, 1.58 μm に見られ、Dome light と比較すると、SAO star にも同様な吸収が若干ではあるが認められる。この結果を見る限り、Dome light には強い輝線や吸収線は無く、大気の吸収を Dome light と合成することができれば、SAO star の代わりにドームを閉じて Dome light 分光をする方がよいという可能性もある。また、図3・4で Twilight 分光の下端が短く、かつ斜めに切れているのは、OHS 本体のねじれ (Dome light 分光は天頂方向であるが、Twilight 分光はかなり望遠鏡を傾けて撮っている) により、mask mirror 上での分散方向が mask に対して斜め (約 0.07°) となりその結果、このような現象が起こっているものと推測される。この量は極めて微小で、夜光マスク上での分散の倍率には影響を与えていない。

OHS 内部の光源による flat は前回と同様にして撮った。図6に J-flat/H-flat の結果を示す。今回は、右上に大きいダストリングの一部が見えている他は、目立ったものはなく良好であったが、明るい部分は J-band で光っているのではなく、H-band で暗くなっている事が原因であることが判った。図7は今回の H-flat を前回の H-flat で割ったものであるが、今回ダストリングのある部分は暗くなっている、即ち、ダストの影響は長い波長ほどよく受け、ミラーの局部的反射率の低下や、入射窓の局部的透過率の低下となって現われているようである (ダストが光っている訳ではない)。

3) 結像精度

今回は、観測3日目に発生した主鏡保持機構のトラブル (図8) のため、3日目・4日目の星像が2つに分かれてしまい、天体がスリット内に収まらなかったり夜光除去率が大幅に低下するなどの影響が出た。観測1日目と2日目は相当な量りであったため seeing が悪く (1 arcsec 以上)、システム全体での結像性能は確認することはできなかった。各観測日の SAO star の大きさを下表に示す。

観測日	filter	FWHM (pix)	seeing (pix)
1日目	J	~4.2	~3
2日目	H	~3.6	~2.5
3日目	H	>4.1 (double)	(~2)
4日目	J	>4.2 (double)	(~2.5)

OHS 光学系の取差による広がり約 1 pixel、また、1 arcsec は 2.6 pixel に相当する。FWHM は1つのピークに対してのみ計算されるので、2つに分かれている3日目・4日目の像の大きさは、表の FWHM で表される値よりもかなり悪い。

観測1日目に mask mirror 上での focus を調べるための Ar lamp scan を行なった (図9)。scan 間隔は 200 μm で、これは mask 上での 100 μm に相当している。その結果、300 μm スリットの image は全幅で 250~350 μm で前々回の観測 (250 μm) に比べてやや悪い値である。像の

ボケの size は 100~200 μm と考えられるが、精度良く測定するためには scan 幅を半分程度にする必要がある。

4) system 全体の効率検査。(standard star)

今回の観測は、3日目以外は雲が多かったため、3日目の Data のみを用いて system 全体の効率を調べた。ただし、この日は主鏡保持機構のトラブルにより星像が2つに分裂していたため、通常の Gaussian fitting による flux 測定ではなく、10 x 10 pixel (3".8 x 3".8) 内での count の総和を調べたため、これまでの方法(半径 12 pixel で fitting し、半径 4 pixel 内部の count を計算する)よりもやや大きめの値となった(量子効率の基準となる pixel の選び方にもよる)。解析は、J・H band とともに 7 frame に対して行なった。

H-band 5.3~5.8%] スリット内部での位置による変化。
J-band 2.5~2.8%]

今回の観測では、前回の観測に比べ特に効率が上がる要因はなく、これは上記の理由により見かけの数値が変化しただけと考えた方が自然である(最も量子効率の良い部分がスリット中央と一致した場合、効率は6%以上になる)。今回はミラーの銀蒸着面が新しいものではなく、やや白く曇っていたため、効率が下がることが予想されたが、銀蒸着面の白い曇りは近赤外ではあまり影響なく、効率は前回とほぼ同じであると結論できる。

5) 残存夜光スペクトル

観測4日目の F10214+4724 の分光観測の直後に、主鏡カバーを閉じて Dark を測定したため、モザイク観測中の装置変形による残存夜光スペクトルの変化を調べることができた(図10)。この日の夜光マスクの位置は、僅かではあるが正しい位置から外れていたために、観測前半と後半で抜け残っている輝線の位置が異なり、しかも、最も良く夜光が除去されている状態でも、1.68 μm 付近で夜光マスクがずれていることが判る。最も良く夜光が除去されているものを前回の分光結果と比較したところ(図11)、J-band はほぼ完全に夜光が除去されたが(この観測は前半夜に行なったため O_2 1.28 μm は非常に強い)、H-band に関しては、1.58 μm 以外はほとんど前回と変わっていない(1.63 μm など、マスクを追加した部分は少しは効果があったようではあるが)。現在抜け残っている夜光スペクトルは、非常に幅が広く、かつスリットとマスクの位置関係の変化(装置変形)に対しても大きく変化することはないため、特定の強い輝線がもれ出ているとは考えにくく、通常の高分散分光観測では測定できないような強度の弱い輝線の集合体であるか、全体的に非常に低いレベルで輝線のすそがもれているか、このような形状の continuum が存在するかのいずれかである。次回の観測では、各々の夜光マスクの幅を少しだけ広くし、また部分的に、測定されていない非常に弱い輝線(理論で予測はされているが)のためのマスクを準備して、残存夜光の原因を探る予定である。

6) mask pattern

今回の観測システムの波長特性を図12に示す。今回用いたマスクは、特に幅の広いマスクを持たなかったため、大きく効率が低下している部分は存在していない。J-band は focus が良く合っていなかったせい凹凸がほとんど見られないが、本来はH-band と同様に凹凸が現われるべきものである。

7) IRAS F10214+4724

この天体には、全観測時間の約半分を使って測光・分光観測を行なった。

観測日	filter	int. (sec)	object (mag)	star A (mag)	obj. -☆A
2日目	H	1200	17.2	16.1	1.1
3日目	H	1920	17.0	15.9	1.1
3日目	H	720	16.9	15.8	1.1
4日目	H	720	17.2	15.8	1.4

3日目の測光観測は2回に分けて行なわれた。これらの測光観測の多くは、dark lane 以外の部分で行なわれている。star A は視野中心から外れているため、測光値の絶対的な値は正確ではない。

観測日	filter	int. (sec)	object (mag)	star A (mag)	obj. -☆A
3日目	J	720	18.1	16.4	1.7
4日目	J	720	17.9	16.5	1.4

測光の方法は system 効率を算出したときと同様、10 x 10 pixel (3".8□) 範囲内の count の総和を調べた。3日目以外は曇りであったので、基本的には3日目の結果のみを信用すべきで、また、J-band は frame 数が少ない上 count も小さいのであまり信用することができない。そのため、H-band 測光値と分光観測結果から予想される J mag も算出した。結果は以下の通り。

J-band 撮像 240 sec x 3 : J = 18.0 (3".8□) (分光結果による補正値は 18.3)
H-band 撮像 240 sec x 8 : H = 17.0 (3".8□) (図13)
分光 480 sec x 30 : (図14・15)

Lawrence et al. (1993, M.N.R.A.S., 260, 28) によると、J = 18.27, H = 17.02で、分光観測での補正値を用いれば良く一致している。また、morphology に関しては3日目・4日目の focus が2つに分かれていたため、2日目の data だけからは広がりや特別な形状を見いだすことはできなかった。分光観測結果を図14・15に示す。非常に強い [O III] 5007, 4959 の他、He II 4686, [Ne III] 3869 等が確認できるが、H β , [O II] 3727 等はほとんど確認することはできない。これらの輝線は、全て夜光マスクの極近傍を通過してきており、He II 4686 は一部が削られている可能性が高く、[O II] 3727 は完全に夜光マスクに重なっているようである。以下に各輝線の近傍に存在する夜光マスクの一覧を示す。

輝線名	近傍の夜光マスク	対応する z
[O II] 3727	12225.7 - 12230.3	2.2803 - 2.2815
	12236.9 - 12238.9	<u>2.2833 - 2.2838</u>
	12256.8 - 12258.8	2.2887 - 2.2892
[Ne III] 3869	12687.3 - 12701.3	2.2792 - 2.2828
	12707.3 - 12709.3	2.2844 - 2.2849
	12715.3 - 12717.3	2.2865 - 2.2870
	12724.1 - 12726.1	2.2887 - 2.2892
He II 4686	15385.0 - 15387.0	<u>2.2832 - 2.2836</u>
	15394.3 - 15396.3	2.2854 - 2.2856
H β	15963.7 - 15978.7	2.2840 - 2.2871
	15983.8 - 15985.8	2.2882 - 2.2886
[O III] 4959	16278.7 - 16280.7	2.2827 - 2.2831
	16301.3 - 16306.7	2.2872 - 2.2883
[O III] 5007	16433.5 - 16435.5	2.2821 - 2.2825
	16441.1 - 16448.6	<u>2.2836 - 2.2851</u>
	16467.8 - 16469.8	2.2890 - 2.2894

アンダーラインは重なっている可能性の高い部分を示す。

各輝線強度は以下ようになった（[O III] 輝線の分離は図16）。

輝線名	強度 $10^{-16} \text{ erg/s/cm}^2$	等価幅 Å
[O II] 3727	--	--
[Ne III] 3869	30.0 ± 6	74 ± 15
He II 4686	8.1 ± 3	22 ± 10
H β	4.0 ± 3	11 ± 10
[O III] 4959	31.7 ± 3	90 ± 10
[O III] 5007	78.6 ± 3	224 ± 10

等価幅は静止波長での値で、error は大体の値である。He II 4686 は夜光マスクにより弱められている可能性があり、[O II] 3727 は夜光マスクによって完全に隠されたようである。

[O III] の強度は Elston et al. (1994, A. J., 107, 910) よりもやや強いが、静止波長での等価幅は continuum が強く観測されているため弱い値となっており、近傍の Radio Galaxy と同程度の強さを示している。Ne の輝線は、可視光での分光結果と同様強く出ている。continuum の強度・等級は以下ようになる。

波長帯	$\text{erg/s/cm}^2 / \mu\text{m}$	μJy	等級
J-band	1.2×10^{-13}	61	18.6
H-band	1.1×10^{-13}	95	17.5

continuum 強度は目測で判断したもので、10% (± 0.1 等) 程度の誤差を含むものと考えられる。

Balmer Jump はこの結果を見る限り、有意には検出されていない。

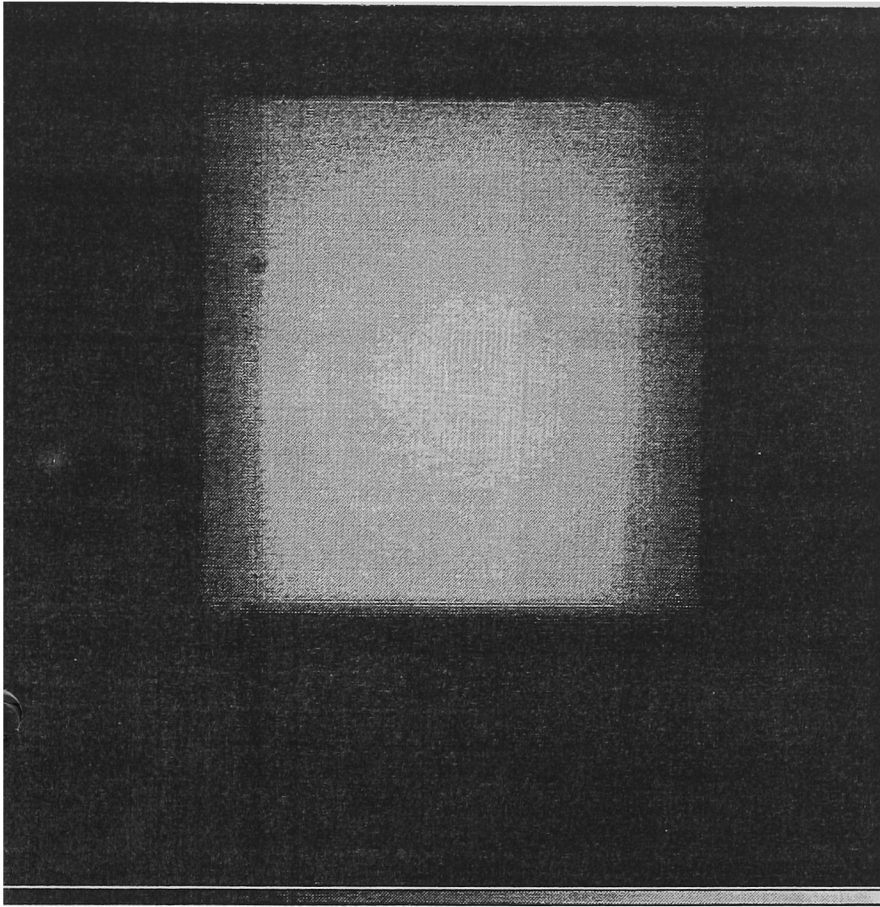


図1 Twilight flat

H-band の薄明 flat。システム全体の透過効率をよく反映している。

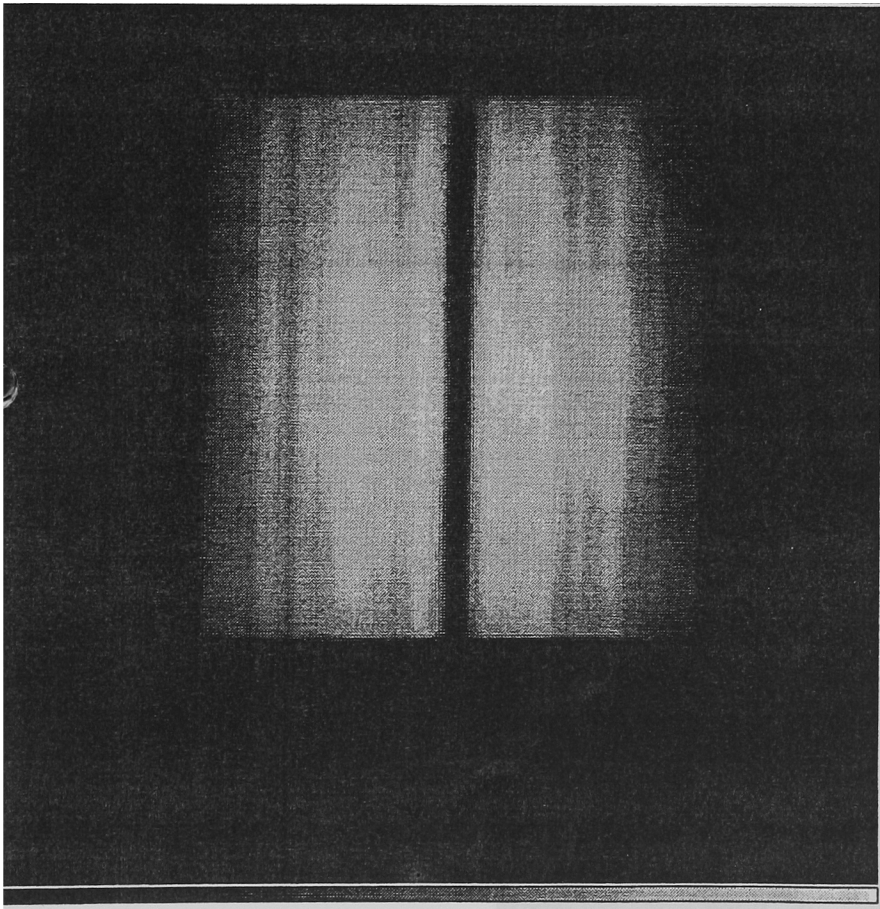


図2 Sky image

図1と同じ日に撮った空。Dark lane に沿った明るさの変化は3%程度以内で一致している。この日は主鏡の像が良くなかったため、夜光除去率が悪く、Dark lane もややはっきりしない。

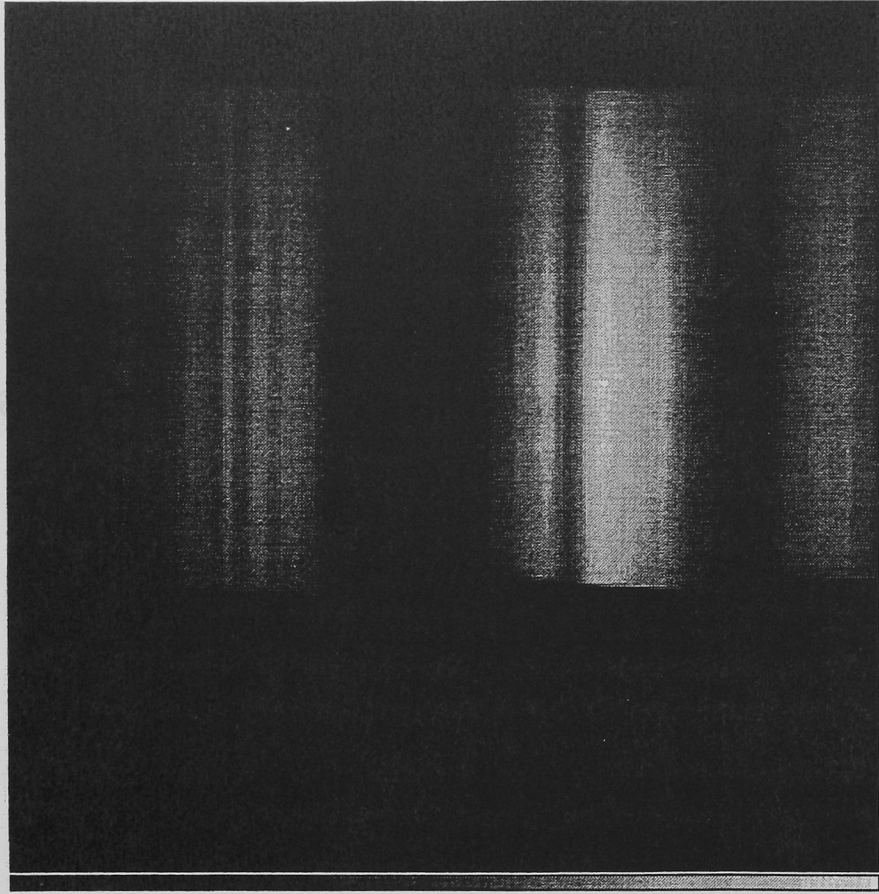


図3 Twilight 分光

薄明光を分光したもの。O₂ 1.28 μ m の吸収が強く出ている。OHS 本体のねじれ変形により、mask mirror 上で分散が斜めにかかっており、その影響でスペクトルの下端が斜めに切れているものと考えられる。

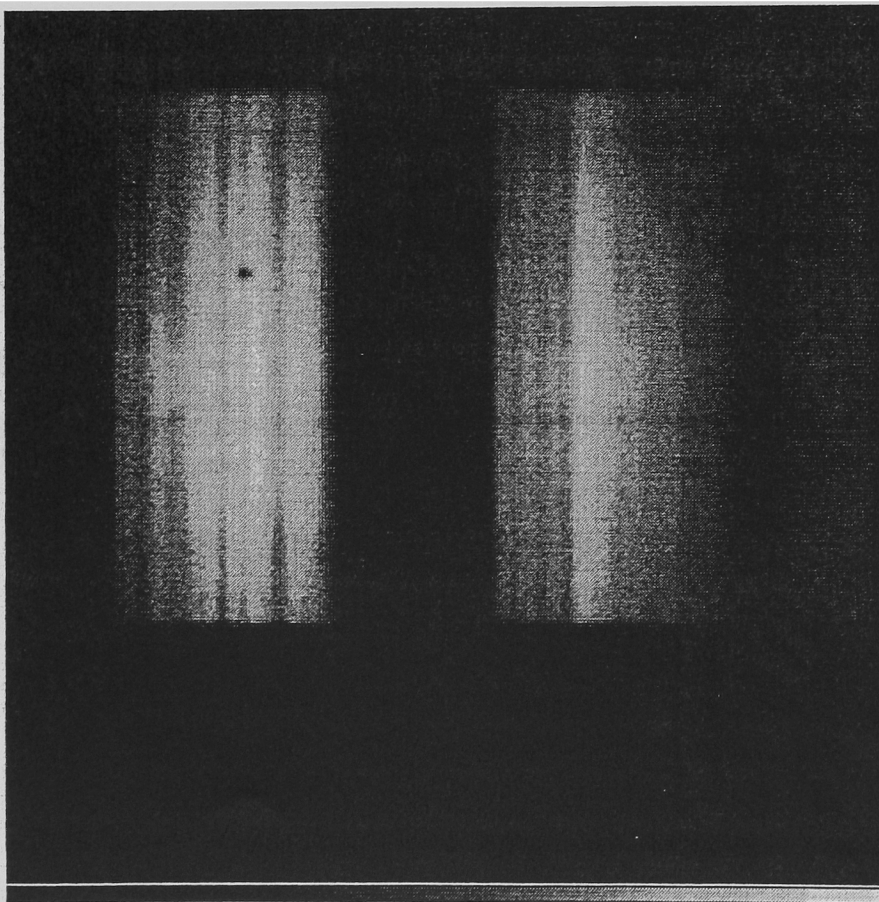


図4 Dome light 分光

ドーム側壁に取り付けられている light 散乱光を分光したもの。大気の吸収を合成する事ができれば、波長方向の感度補正に利用できる可能性は高い。

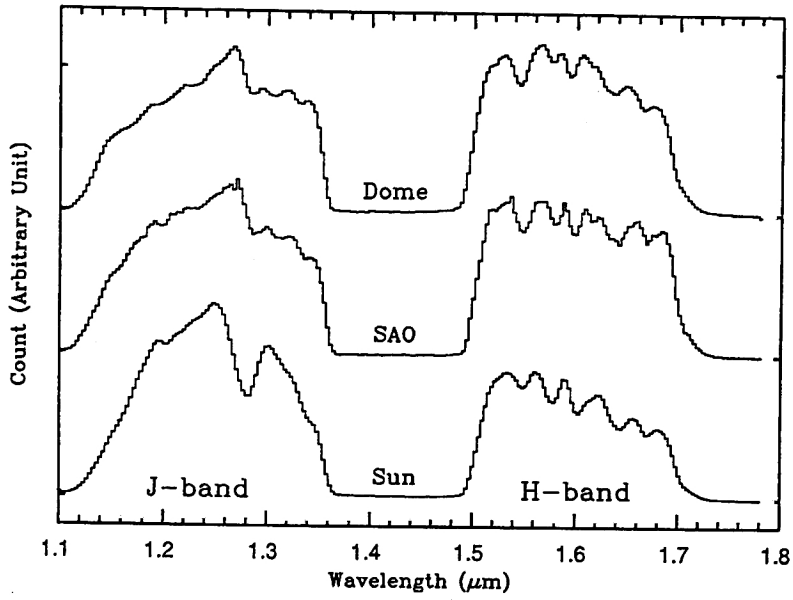


図5 各種光源の比較

1.28 μm , 1.58 μm の O_2 の吸収は夕方 (sun) ほど大きく、SAO star にも少し見られることが判る。

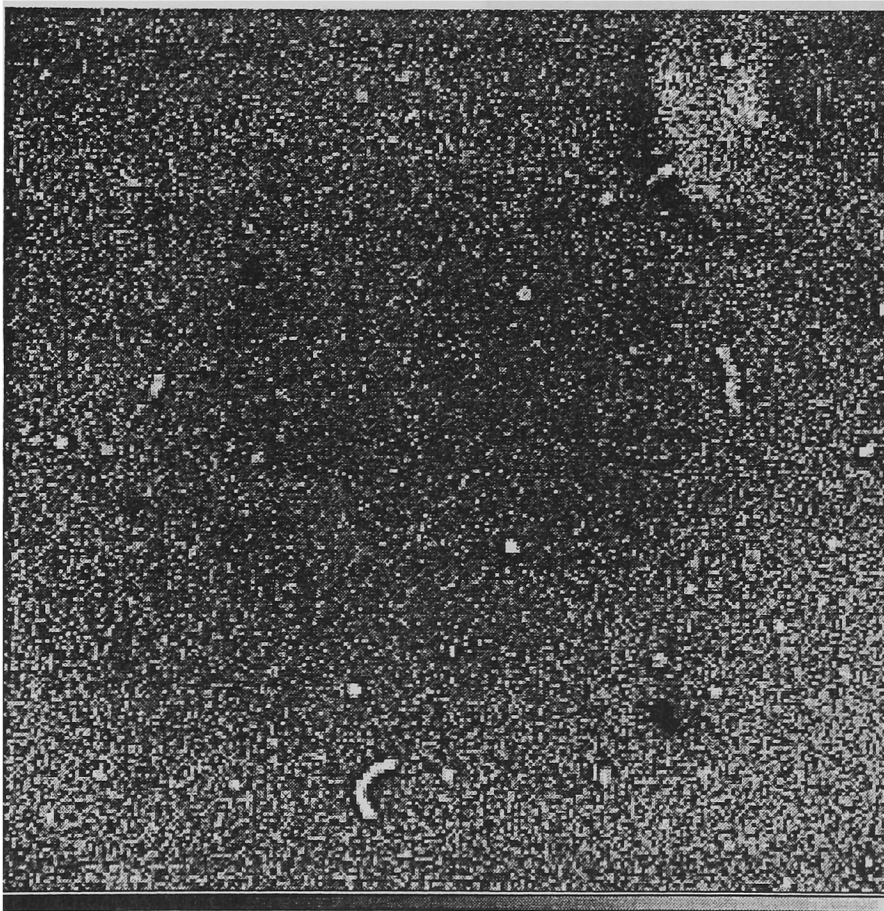


図6 J-flat/H-flat

右上に大きい Dust ring の一部が見えている。

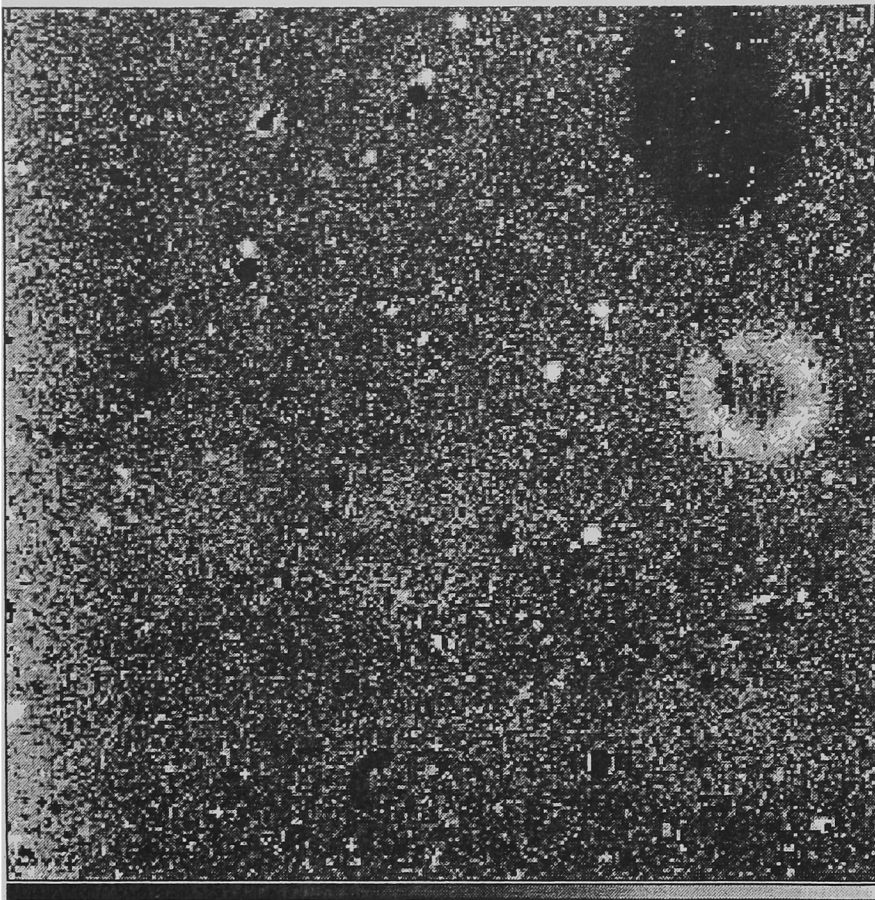


図7 今回のH-flat/前回のH-flat

Dust ring に相当する部分は暗くなっており、Dust は光っているのではなく、影を落としている事が判る。長波長ほど Dust の影響を受けるようである。



図8 主鏡変形による像の分裂

これは、焦点面外での星像で、本来ならドーナツ状に見えるべきものである。

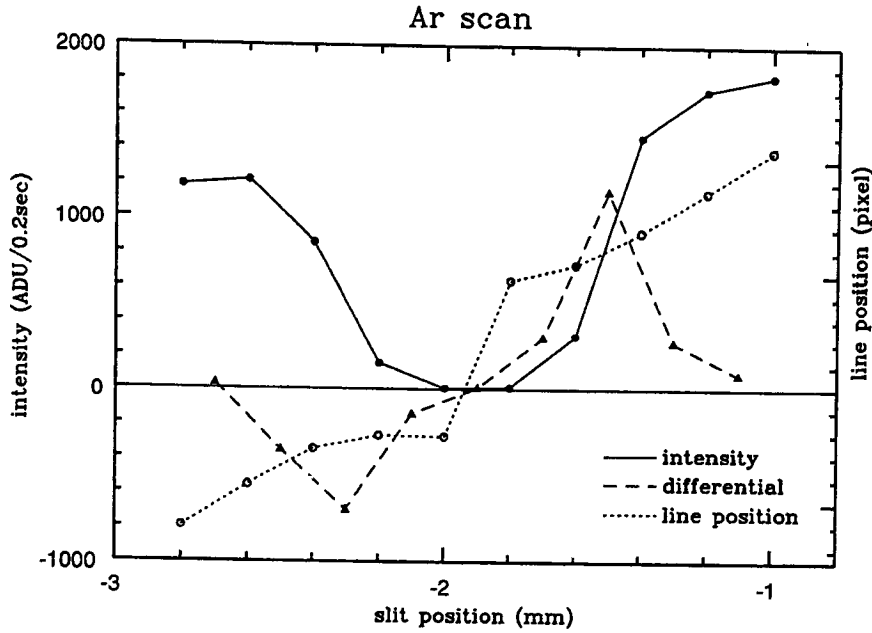


図9 Ar lamp による結像検査

ある特定の line が夜光マスクを横切るときの強度変化の様子。differential は実際のスリット像を表しているものと考えられる。スリット像の幅は全幅で 250~350 μm (スリット位置にして 500~700 μm) で、前々回の結果よりやや悪い。精度良く測定するためには、scan 間隔をこの半分にする必要がある。

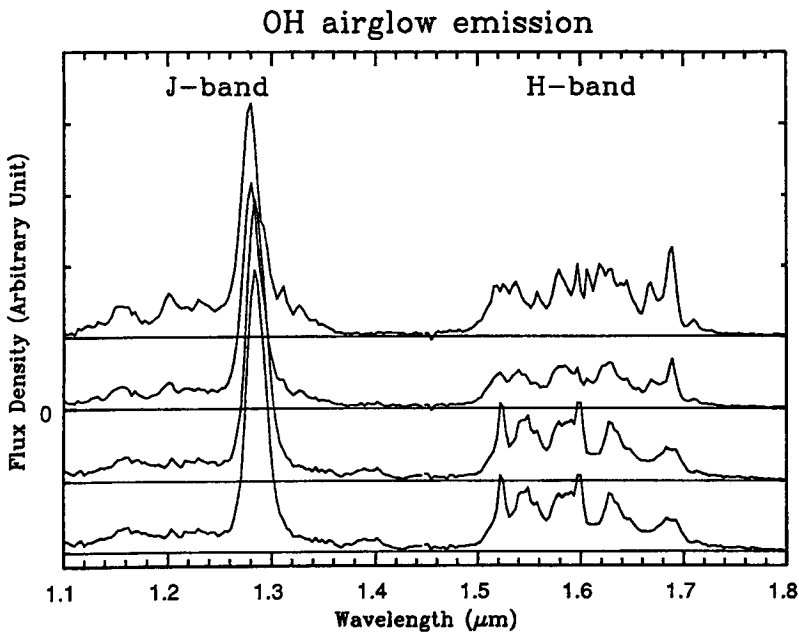


図10 装置変形による残存夜光の変化

下から順に、分光開始30分後より30分間隔で残存夜光スペクトルを調べたものである。mask 上での分散倍率が完全には調整されていないため、全てが最良となる部分はなく、また、H-band で最もよく除去されている場合に J-band で漏れが若干認められるが、前日の主鏡変形の影響が残っていたこともあるため、mask 不完全によるものであるかどうかは不明。

OH airglow emission

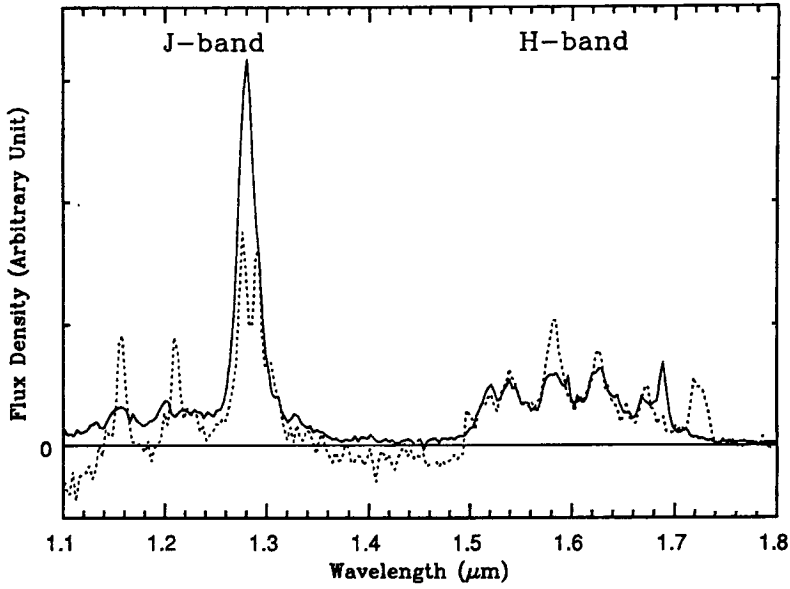


図11 前回の残存夜光スペクトルとの比較

今回、新たに夜光マスクを追加した部分は、効果の違いはあるが、全てに対して効果が見られる (1.68 μm は mask 位置の調整不良によるもので、正しく調整すればこの部分は前回以下になる)。しかし、H-band での残存スペクトルには広がった成分が残っており、この部分を減らさない限り、夜光除去率を 1/30 にする事はできない。

Mask pattern

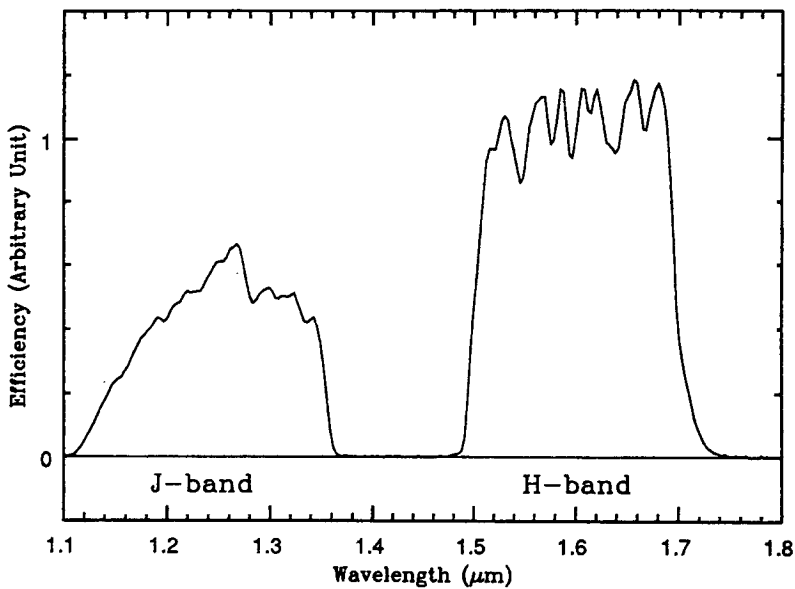



図12 波長による感度特性の変化

今回は、mask 密度が特に大きいところは  かったため、大きな凹みは見られない。

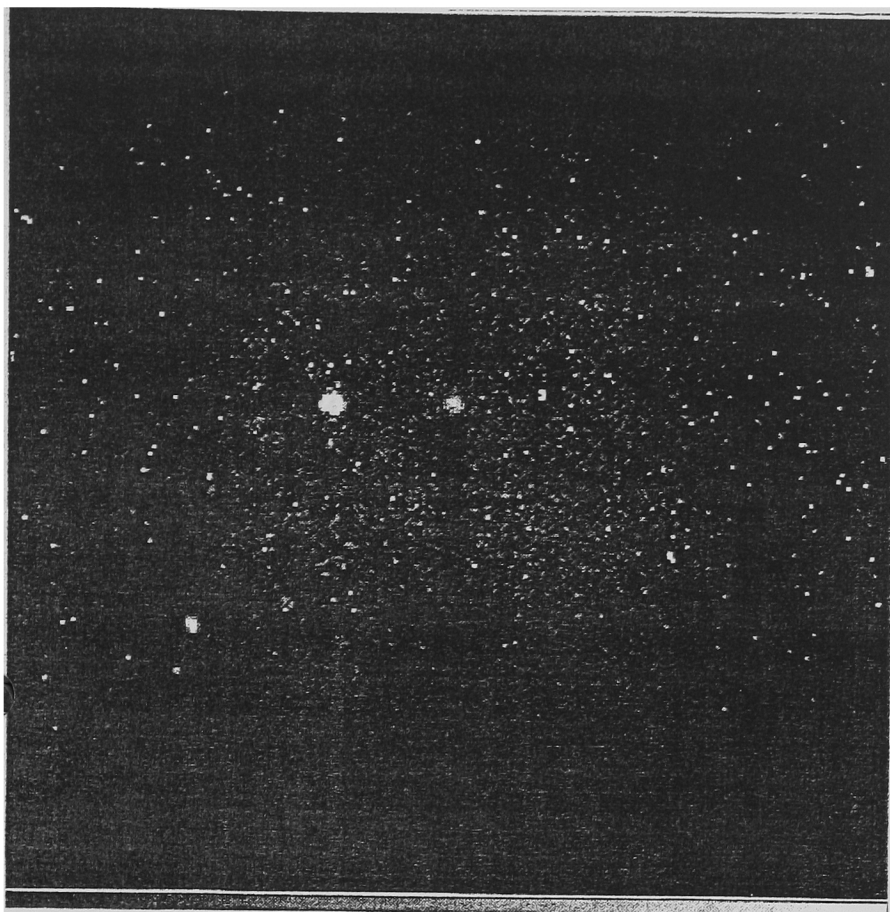


図13 IRAS F10214+4724 (H-band)

H-band の全 frame (240 sec x 19) を重ねたもの。明るい星が star A でその右に暗く広がっている天体が F10214+4724。Bad pixel は、Object 近傍のみしか処理をしていない。

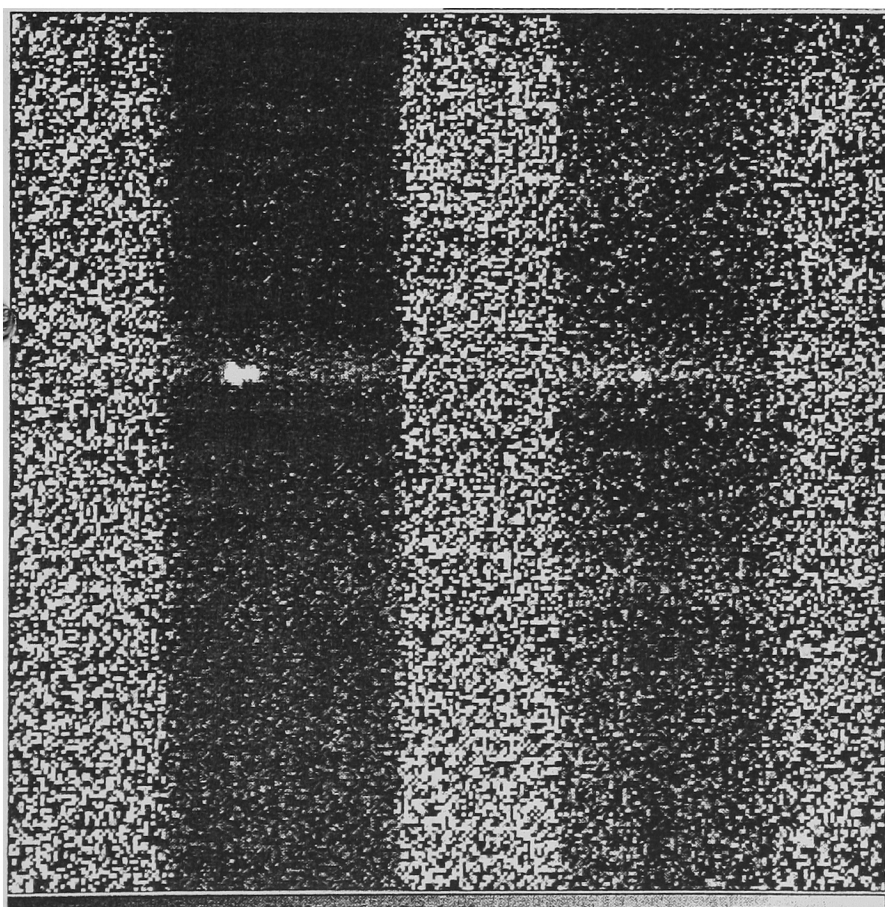


図14 IRAS F10214+4724 (分光)

取得した全 frame の3/4 (480 sec x 30) を処理して重ねたもの (残りは不良 frame)。波長方向の感度を補正してあるため、感度の無い部分はノイズが強調されている。左側の H-band には [O III] 4959,5007 が、右側の J-band には [Ne III] 3869 が写っており、continuum もはっきりと確認できる。

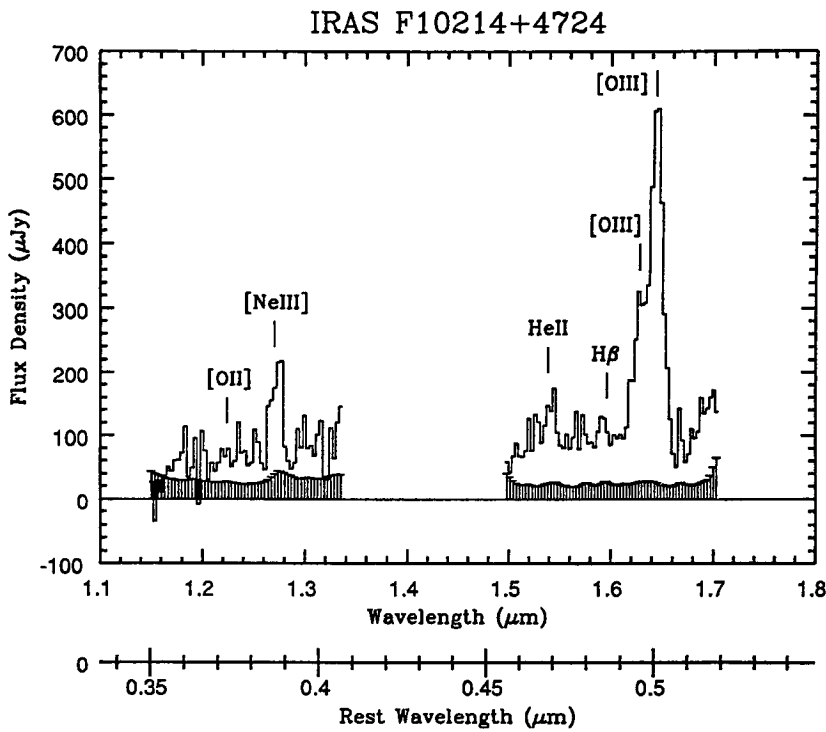


図15 IRAS F10214+4724 (スペクトル)

[OIII], [NeIII] の他、HeIIやH β も確認できる。[OII]は、夜光マスクに重なってしまったためか、見えていない。グラフ下の縦線は error level で、この状態では J-band で S/N はやや悪いが、4 pixels (1 spectral element) で binning すると良くなる。

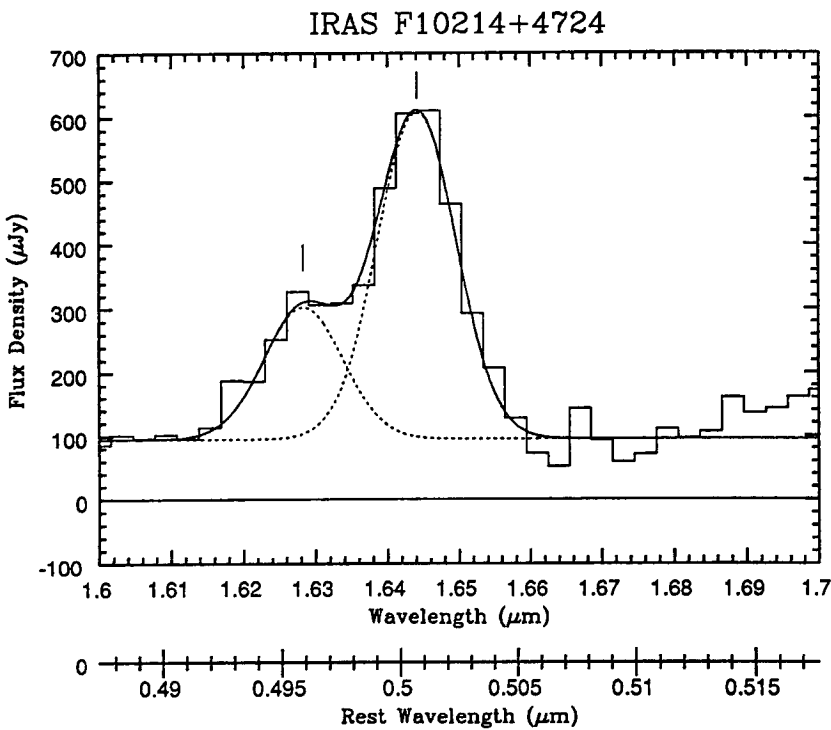


図16 [OIII] 4959, 5007 の分離

2つの同じ幅を持つ Gaussian で分離し、様子。

Class.	No.	Filter	Int. (sec)	ADU	Comment
B	1043	J OPN	2 F6	2	
B	1045	H OPN	2 F6	2	
B	1058	H BLK	5 F6	3	
B	3112	1.7 OPN	1 F9 (8)	6	After 480s
B	3113	1.7 OPN	1 F6	1	
B	3116	H OPN	0.2 F6	1	
B	3120	J BLK	0.2 F6	1	
B	3121	J BLK	0.2 F6	1	
B	3122	J BLK	0.2 F9 (8)	5	
B	3123	J BLK	0.2 F9 (8)	5	
BD	1001	H BLK	15 F6	13	
BD	1002	H BLK	100 F6	19	
BD	1003	H BLK	200 F6	6	Liquid N ₂
BD	1056	H BLK	240 F6	17	Dome off
BD	1057	H BLK	240 F6	13	
BD	1156	H BLK	240 F6	13	Ghost
BD	1157	H BLK	240 F9 (8)	18	Ghost
BD	1158	H BLK	240 F9 (8)	20	Ghost
BD	2000	H BLK	240 F9 (8)	-13	Liquid N ₂
BD	2001	H BLK	480 F9 (8)	-1	Liquid N ₂
BD	2141	H BLK	240 F9 (8)	31	Ghost
BD	2142	H BLK	240 F9 (8)	20	Ghost
BD	2143	H BLK	240 F6	12	
BD	2144	H BLK	240 F6	5	
BD	3106	H BLK	240 F6	16	Ghost
BD	3107	H BLK	240 F6	17	Ghost
BD	3108	H BLK	240 F6	17	Ghost
BD	3118	J BLK	240 F6	45	Liquid N ₂
BD	3119	J BLK	240 F6	-24	Liquid N ₂
BD	3136	1.7 BLK	30 F6	19	
BD	3137	1.7 BLK	30 F6	10	
BD	3138	1.7 BLK	30 F6	9	
BD	3139	1.7 BLK	30 F6	8	
BD	3140	1.7 BLK	30 F6	7	
BD	3141	1.7 BLK	30 F6	6	
BD	3142	1.7 BLK	240 F6	21	
BDT	1012	H OPN	60 F6	13	
BDT	3115	H OPN	240 F6	48	
BDT	1129	J OPN	120 F6	10	
BDT	3109	J OPN	240 F6	15	
BDT	1042	1.7 OPN	240 F6	26	
BDT	1059	1.7 OPN	240 F6	26	
BDT	2012	1.7 OPN	10 F6	4	Flat
BDT	2013	1.7 OPN	60 F6	13	Flat
BDT	3039	1.7 OPN	480 F9 (8)	43	
BDT	3110	1.7 OPN	240 F9 (8)	25	
BDT	3111	1.7 OPN	480 F9 (8)	43	
BDT	3114	1.7 1.9	240 F9 (8)	22	
BDT	3117	1.9 OPN	240 F9 (8)	194	

Bias

F6 1~2 ADU
F9 (8) 5~6 ADU

Dark

H BLK 13 ADU/240sec

Thermal

H OPN 32 ADU/240sec
J OPN 0~3? ADU/240sec
1.7 OPN 6~10 ADU/240sec
1.7 1.9 4 ADU/240sec
1.9 OPN 176 ADU/240sec